



**PANTHÈRE DES NEIGES** Les photos de Vincent Munier...

... et le regard de  
**Justine Alexander**  
biologiste  
de la conservation



# Pour la Science

La science expliquée par ceux qui la font

■ Psychologie sociale

**QUAND L'ENFANT  
DEVIENT UN  
ADULTE VIOLENT**

■ Médecine

**DES PRISES DE SANG  
POUR DÉCRYPTER  
LE CANCER**

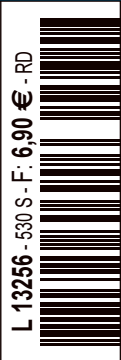
■ Statistiques

**L'ESPÉRANCE DE  
VIE, UNE NOTION  
PAS SI SIMPLE**

12/21

## LA THÉORIE DES CATÉGORIES

Une vision  
unificatrice en  
mathématiques



L 13256 - 530 S - F. 6,90 € - RD

Édition française de Scientific American - Décembre 2021 - n° 530  
DOM: 790 € - BEL/LUX: 790 € - CH: 12,70 CHF - CAN: 12,50 \$CA - TOM: 1040 XPF

# De cause à effets

---



Le magazine  
de l'environnement

Disponible sur [franceculture.fr](https://franceculture.fr)  
et l'application Radio France

LE MARDI  
DE 21H À 22H

Aurélie  
Luneau



L'esprit  
d'ouverture.

En partenariat avec







**Maurice Mashaal**  
Rédacteur  
en chef

## PRENDRE DU REcul POUR AVANCER

**P**eut-on vulgariser les mathématiques? Bien que la question soit souvent posée, la réponse est clairement positive. Nombre d'ouvrages et articles le démontrent. Peut-on vulgariser *toutes* les mathématiques? La réponse est, là, plutôt négative (mais elle l'est aussi dans d'autres disciplines, par exemple la chimie ou l'informatique). Certains domaines impliquent en effet tant de technicité, d'abstraction ou de connaissances préalables qu'il serait très difficile pour les non-initiés d'en saisir les concepts, les problématiques, les méthodes, l'intérêt...

Reste que la vulgarisation est une activité à géométrie variable, qui dépend de l'objectif et du public visés. Lui fixer *a priori* des limites équivaldrait donc à un renoncement prématuré. *Pour la Science* a ainsi fait dans ce numéro le pari de présenter, avec deux articles aux points de vue différents, l'un des champs les plus abstraits des mathématiques, la théorie des catégories (*voir pages 30 à 49*).

Née dans les années 1940, cette théorie connaît aujourd'hui un regain d'intérêt et commence à trouver des applications dans d'autres sciences comme la physique ou, plus étonnamment, la linguistique. Sa démarche revient à prendre du recul, ou de la hauteur, afin de s'affranchir des détails spécifiques de telle ou telle famille d'objets mathématiques et de se focaliser sur leurs relations. Elle établit ainsi des liens entre des pans mathématiques de natures différentes, liens qui sont précieux pour aller de l'avant...

La prise de recul inhérente à la théorie des catégories conduit à des sommets d'abstraction. L'inverse en quelque sorte de ce à quoi aspire la vulgarisation, qui nécessite pourtant elle aussi de prendre du recul pour se concentrer sur l'essentiel et ne pas noyer le lecteur dans d'inutiles détails.

Prendre du recul peut donc avoir des significations assez différentes selon le contexte, mais laisse toujours présager, paradoxalement, une avancée. L'expression peut d'ailleurs s'appliquer à votre serviteur, pour qui le temps est venu de passer la main. Et aussi, par ricochet, à *Pour la Science*, qui, comme les autres médias, doit relever le défi posé par les mutations touchant le monde de l'information et les changements des habitudes de lecture.

Merci de votre fidélité, et bonnes fêtes de fin d'année! ■

# SOMMAIRE

N° 530 / Décembre 2021

CAHIER PARTENAIRE  
PAGES I À III (APRÈS LA P. 26)

Gestion de crise :  
le nécessaire partage  
d'un récit

parrainé par

IRSN

Pour la  
**Science.fr**

LETTRE D'INFORMATION

NE MANQUEZ PAS  
LA PARUTION DE  
VOTRE MAGAZINE  
GRÂCE À LA NEWSLETTER

- Notre sélection d'articles
- Des offres préférentielles
- Nos autres magazines en kiosque

Inscrivez-vous  
[www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)

## ACTUALITÉS

P. 6

### ÉCHOS DES LABOS

- L'histoire de la formation des continents réécrite
- Un « chatbot » pour vaincre l'hésitation vaccinale
- Des bifaces de 1,67 million d'années en Algérie
- Hépatite B : les avatars du virus
- Sublimation sous les « zen stones »
- Comment s'épuisent les lymphocytes T
- Le berceau des chevaux domestiques
- De la rupture des noyaux cellulaires aux métastases
- Covid-19 : les vaisseaux fantômes du cerveau
- Les prix Nobel 2021

P. 18

### LES LIVRES DU MOIS

P. 22

### DISPUTES ENVIRONNEMENTALES

Un zéro fallacieux

Catherine Aubertin

P. 24

### LES SCIENCES À LA LOUPE

L'innovlangue, ou le discours creux de l'innovation

Yves Gingras

## GRANDS FORMATS



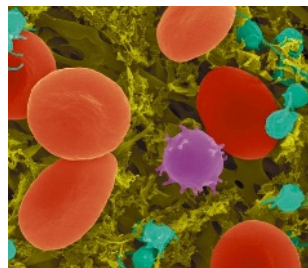
P. 50

### PORTFOLIO

#### À LA RECHERCHE DE LA PANTHÈRE DES NEIGES

Cécile Lestienne

À l'occasion de la sortie au cinéma du documentaire *La Panthère des neiges*, de Marie Amiguet et Vincent Munier, découvrons ce félin méconnu à travers quelques somptueuses images commentées par la biologiste de la conservation Justine Shanti Alexander.



P. 58

### MÉDECINE

#### DÉCRYPTER LE CANCER AVEC DES PRISES DE SANG

Catherine Alix-Panabières, Olivier Panabières et Christian Siatka

En analysant les cellules tumorales qui circulent dans le sang d'un malade atteint de cancer, on peut mieux caractériser la maladie et évaluer sa progression. Et choisir le traitement le plus adapté.



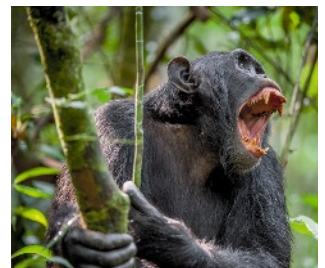
P. 66

### ANTHROPOLOGIE

#### L'HYDRE DE LA VIOLENCE HUMAINE

Charles-Édouard de Suremain

Qu'est-ce que la violence ? Si nous en avons tous une intuition ou une expérience, comment la décrire, la désigner et la comprendre ? L'anthropologie propose des clés pour décrypter les différents aspects de ce phénomène protéiforme.



P. 70

### ÉTHOLOGIE

#### LA VIOLENCE, UNE EXCEPTION CHEZ NOS PROCHES COUSINS ?

Shelly Masi

Il est rare que les chimpanzés ou les gorilles deviennent violents, mais certains événements changent parfois la donne...



En couverture :  
© Shutterstock.com/Uniyok

Ses portraits des contributeurs sont de Seb Jarnot

Ce numéro comporte un encart d'abonnement *Pour la Science*, broché en cahier intérieur, sur toute la diffusion kiosque en France métropolitaine. Il comporte également un courrier de réabonnement, posé sur le magazine, sur une sélection d'abonnés ainsi qu'un encart *Pure Pepper* et un encart *Restos du cœur* sur une sélection d'abonnés en France métropolitaine.



P. 74

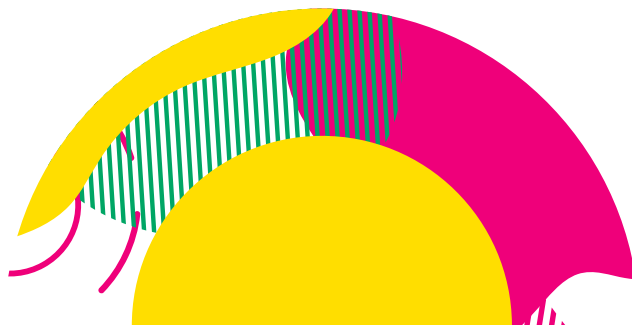
**PSYCHOLOGIE SOCIALE**

### DE L'ENFANT À L'ADULTE VIOLENT

*Laurent Bègue-Shankland*

Les comportements agressifs à l'âge adulte ont souvent leurs racines dans l'enfance. Loin d'être déterminés durant le développement de l'enfant, ils pourraient être pris en charge par des mesures préventives.

À LA  
UNE



**MATHÉMATIQUES**

P. 30

### THÉORIE DES CATÉGORIES: LES MATHS À VOL D'OISEAU

*Manon Bischoff*

Née il y a environ quatre-vingts ans, la théorie des catégories a permis d'identifier des liens entre des objets mathématiques de natures différentes, d'où de grandes avancées. Depuis peu, elle s'ouvre à d'autres disciplines: la physique, l'informatique... et même la linguistique.

P. 38

### DES CATÉGORIES À L'INFINI

*Emily Riehl*

La théorie des catégories est un outil puissant pour révéler des liens cachés entre objets mathématiques très différents. En généralisant cette approche à des dimensions infinies, les chercheurs créent de nouvelles connexions utiles entre des concepts toujours plus complexes.



**RENDEZ-VOUS**

P. 80

**LOGIQUE & CALCUL**

### PAS SI SIMPLE, L'ESPÉRANCE DE VIE!

*Jean-Paul Delahaye*

L'espérance de vie publiée par les statisticiens indique-t-elle combien de temps en moyenne il nous reste à vivre? Non, car les calculs reposent sur les statistiques passées, qui ne se reproduiront pas nécessairement...

P. 86

**ART & SCIENCE**

### L'âme de l'éléphant

*Loïc Mangin*



P. 88

**IDÉES DE PHYSIQUE**

### Une balance qui ne perd pas l'équilibre

*Jean-Michel Courty  
et Édouard Kierlik*

P. 92

**CHRONIQUES  
DE L'ÉVOLUTION**

### Quand les crapauds deviennent cannibales

*Hervé Le Guyader*

P. 96

**SCIENCE & GASTRONOMIE**

### Des suspensions dans les saucisses

*Hervé This*

P. 98

**À PICORER**



# A

## ACTUALITÉS

P.6 Échos des labos

P.18 Livres du mois

P.22 Disputes environnementales

P.24 Les sciences à la loupe

### GÉOSCIENCES

# L'HISTOIRE DE LA FORMATION DES CONTINENTS RÉÉCRITE



Ce paysage australien montre un affleurement de roches sédimentaires datant de 3,5 milliards d'années (craton de Pilbara). L'analyse des rapports isotopiques de telles roches renseigne sur l'histoire de la formation de la croûte continentale.

**Depuis 3,7 milliards d'années, la croissance des masses continentales semble s'être déroulée de façon épisodique, et non continue comme l'affirmaient de précédentes études.**

**L**es continents terrestres sont une des caractéristiques uniques de notre planète. Contrairement à la croûte océanique, dont l'âge ne dépasse pas 200 millions d'années car elle est régulièrement recyclée, la croûte continentale est beaucoup plus ancienne et nous permet de remonter loin dans l'histoire géologique. Toutefois, en raison de la tectonique des plaques et de l'érosion, ces roches sont souvent si modifiées qu'il peut être difficile d'en tirer des informations sur leur origine. Marion Garçon, chercheuse du CNRS à l'université de Clermont-Auvergne, a réussi à les faire parler pour proposer un tout nouveau modèle de formation des masses continentales depuis 3,7 milliards d'années.

Pour ce faire, la géochimiste a compilé les données disponibles sur les roches sédimentaires continentales depuis les années 1980 jusqu'à aujourd'hui. Ces roches se forment à partir des débris de l'érosion des roches continentales.

**Les roches continentales sont riches en silice depuis au moins 3,7 milliards d'années**

Marion Garçon s'est intéressée à des isotopes quasi stables de deux éléments chimiques, le samarium (Sm) et le

néodyme (Nd). «Les processus sédimentaires ne modifient pas la composition des roches pour ces deux isotopes», explique-t-elle. On peut donc estimer que la composition isotopique des sédiments est identique à celle des roches continentales dont elles sont issues.

Le premier paramètre étudié par Marion Garçon est la composition de la croûte continentale en fonction du temps, que l'on peut déterminer grâce au rapport isotopique  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ , dont la valeur est inversement proportionnelle au taux de silice ( $\text{SiO}_2$ ). D'après les résultats obtenus, les roches continentales sont riches en silice depuis au moins 3,7 milliards d'années, avec des taux toujours supérieurs à 60% (66,6% aujourd'hui). Cela va à l'encontre des modèles antérieurs, qui estimaient que les continents avaient

été longtemps pauvres en silice et qu'ils se sont enrichis progressivement au fil du temps. « Mes résultats ne remettent pas en cause le fait qu'au début de l'histoire de la Terre la croûte était pauvre en silice, précise Marion Garçon, mais c'était il y a plus de 3,7 milliards d'années. Il y a certainement eu une transition majeure avec une différenciation crustale plus importante pour que les continents s'enrichissent en silice, mais cela n'est pas enregistré dans les sédiments de 3,7 milliards d'années à nos jours. »

La géochimiste a ensuite évalué la croissance des masses continentales à l'aide du rapport isotopique  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ . En comparant les rapports mesurés dans les roches au cours du temps avec un modèle des valeurs attendues en cas de croissance continue de la croûte continentale, elle a montré que la formation d'une nouvelle croûte continentale n'est pas un processus continu, mais épisodique, avec au moins six pics de production depuis 3,7 milliards d'années, tous les 500 à 700 millions d'années.

Cette épisodicité dans la croissance des continents pourrait être liée aux cycles de formation et de démantèlement des supercontinents, qui eux aussi ont une périodicité proche de 500 millions d'années. Mais, tempère la chercheuse, « la précision de mon étude est de l'ordre de 200 millions d'années, et les travaux sur les cycles des supercontinents sont aussi très peu précis d'un point de vue temporel. » D'autres analyses sont donc nécessaires pour explorer le lien de causalité entre ces cycles et la formation d'une nouvelle croûte continentale.

Pour Marion Garçon, ces découvertes remettent en question les modèles qui, jusqu'ici, proposaient un grand changement dans le fonctionnement de la tectonique des plaques il y a 2,5 à 3 milliards d'années : « On ne voit aucune variation dans la composition chimique des roches ni dans les mécanismes épisodiques de formation, il n'y a pas de ruptures majeures comme celles que suggéraient beaucoup d'études précédentes. » Même s'il faut, selon elle, se montrer prudent, « il n'y a donc pas de raison de penser que les mécanismes de la tectonique des plaques aient changé depuis 3,7 milliards d'années. » ■

Nicolas Butor

M. Garçon, *Science Advances*, vol. 7, article eabj1807, 2021

## Un « chatbot » pour vaincre l'hésitation vaccinale

De nombreux Français sont encore réticents à se faire vacciner contre le Covid-19. Mais un « chatbot » conçu par une équipe du CNRS, de l'Inserm et de l'École normale supérieure – un outil de conversation en ligne qui dialogue avec chaque utilisateur – pourrait aider à les convaincre. Les explications de Coralie Chevallier, qui a coordonné l'étude.



Propos recueillis par Gaia Jouanna

**CORALIE CHEVALLIER**  
chercheuse en sciences cognitives à l'École normale supérieure et à l'Inserm, à Paris

### Comment vous est venue l'idée de créer ce chatbot ?

Mon collègue Hugo Mercier est spécialiste de l'argumentation. Il a déjà utilisé des outils de ce type pour essayer de dépasser le fossé qui existe parfois entre le consensus scientifique et l'opinion publique. À chaque fois, il a constaté que l'argumentation grâce au chatbot était un outil puissant pour faire évoluer les opinions. Chacun a des croyances, mais quand on fournit aux personnes des arguments, et des réponses à leurs contre-arguments, les capacités de raisonnement mènent à une opinion plus rationnelle.

### Comment avez-vous élaboré le chatbot ?

Dans un monde idéal, ce dialogue devrait avoir lieu entre chaque personne qui se pose des questions et des tiers de confiance, comme le médecin généraliste. Nous avons commencé le travail en décembre 2020, au moment de l'arrivée des premiers vaccins. Toute la population ne pouvait pas avoir accès en même temps à ce tiers de confiance. Nous nous sommes donc dit qu'il fallait élaborer un outil vite accessible à tous. Nous avons exploré les réseaux sociaux et la presse pour comprendre les contre-arguments les plus fréquemment utilisés. Nous avons synthétisé l'ensemble des questions, puis des médecins, professionnels de santé et chercheurs en épidémiologie et virologie nous ont aidés à écrire les réponses et ont relu les textes finaux. Nous avons abouti à un dispositif qui mime l'échange d'arguments et de contre-arguments avec des tiers de confiance.

### Quelle étude avez-vous réalisée pour démontrer son efficacité ?

L'étude a eu lieu en ligne. Nous avons recruté plus de 700 personnes par divers canaux – s'inscrivait qui voulait. Ce n'est donc pas un échantillon représentatif

de la population française (les participants étaient en moyenne plus jeunes et plus diplômés que la population générale), mais suffisant pour tirer des conclusions. L'essai était randomisé, avec la même méthode que pour tester des médicaments : on prend un groupe de personnes suffisamment grand, une moitié tirée au sort reçoit le traitement (ici le chatbot) et l'autre (le groupe contrôle) un placebo (ici un court paragraphe). On a ensuite comparé les opinions dans les deux groupes. Le nombre de personnes qui avaient une opinion positive des vaccins a augmenté de 37 % dans le groupe qui avait échangé avec le chatbot (5 à 10 minutes en moyenne), et l'intention de refuser le vaccin a diminué de 20 %. Dans le groupe contrôle, on n'observait pas ces changements.

### À votre avis, d'où vient cette efficacité ?

Chaque personne se pose des questions différentes. Si l'on doit répondre à toutes à la fois dans un seul texte, c'est décourageant pour le lecteur. Grâce à l'aspect conversationnel, les personnes peuvent directement regarder la réponse à une question qu'ils se posent, et facilement en explorer d'autres.

De plus, nous avons veillé à donner des garanties de confiance. C'est quelque chose que l'on ne peut pas faire dans une communication à très large échelle, comme des affiches dans la rue. Les utilisateurs pouvaient cliquer sur un onglet « Pourquoi devrais-je vous faire confiance ? », qui expliquait comment on avait produit les données.

### Quelles sont les prochaines étapes ?

Il serait intéressant de déployer ce type d'outil à plus grande échelle et de vérifier que nos résultats sont confirmés en population générale. Et de permettre à des personnes en interaction avec le public et ne pouvant pas répondre aux questions individuellement de s'approprier cette approche, qui va au-delà de la communication publique habituelle. ■

S. Altay et al., *Journal of Experimental Psychology: Applied*, en ligne le 28 octobre 2021

## PALÉOANTHROPOLOGIE

# DES BIFACES DE 1,67 MILLION D'ANNÉES EN ALGÉRIE

Près de l'oued Boucherit, dans la région de Sétif, un site préhistorique vient de livrer les plus anciens outils acheuléens d'Afrique du Nord.

**P**our la deuxième fois, un petit vallon algérien modifie notre vision de l'évolution humaine. L'oued Boucherit, à une vingtaine de kilomètres de Sétif, est déjà connu pour avoir livré des outils taillés vieux de 2,4 millions d'années. Avec des collègues algériens et espagnols, Mathieu Duval, du Centre national de recherche sur l'évolution humaine (Cenieh), à Burgos, en Espagne, et Mohammed Sahnouni, lui aussi du Cenieh et affilié également au Centre national de recherches préhistoriques, anthropologiques et historiques d'Alger, viennent de mettre en évidence près de l'oued Boucherit les plus anciens vestiges acheuléens d'Afrique du Nord.

L'Acheuléen est une culture matérielle du Paléolithique inférieur caractérisée par une technique spécifique de taille de la pierre, dont les premiers artefacts connus se trouvent en Afrique de l'Est et datent de 1,76 million d'années. Ses marqueurs sont d'une part les bifaces, de grands outils en forme de goutte façonnés dans un bloc sur leurs deux faces pour les rendre coupants vers la pointe, et d'autre part les hachereaux, de grands éclats modifiés sur leurs deux faces pour produire à une extrémité un tranchant plat. L'Acheuléen suit l'Oldowayen, lié à une technique d'affûtage grossier de galets, apparu en Afrique de l'Est il y a quelque 2,6 millions d'années... et dans l'oued Boucherit il y a 2,4 millions d'années. En 2019, les mêmes chercheurs avaient publié cette datation, qui est sensationnelle car elle suggère une quasi-synchronicité de l'Oldowayen en Afrique de l'Est et du Nord.

Cette émergence quasi simultanée des innovations culturelles dans les deux régions se répète pour l'Acheuléen. Sur le versant oriental du vallon, les chercheurs ont mis au jour une strate contenant 25 outils acheuléens. Ils l'ont datée à 1,67 million d'années, en utilisant le système chronologique complexe déjà mis au point pour l'Oldowayen de l'oued Boucherit. Façonnés dans le calcaire local, ces outils sont peu évolués, de grande taille et plutôt lourds. On y note la présence de nucléus, de grands éclats, de trièdres servant de pics et de bifaces grossièrement taillés.

Avant ces découvertes, le plus ancien Acheuléen nord-africain était celui de



L'oued Boucherit semble un banal vallon, mais plusieurs sites préhistoriques majeurs l'entourent.



L'un des bifaces trouvés près de l'oued Boucherit.

Casablanca, au Maroc, daté à 1,3 million d'années, et celui de Tighennif, en Algérie, datant d'au moins 1 million d'années. En Afrique australe, l'Acheuléen le plus ancien remonte, lui, à 1,7 million d'années. Après 1,6 million d'années, la taille acheuléenne s'est généralisée en Afrique. Cette constatation invite à penser l'évolution du genre *Homo* selon deux hypothèses : soit une maturation cognitive a fait émerger l'Acheuléen progressivement et simultanément dans toute l'Afrique, soit cette culture matérielle s'est propagée dans le continent depuis l'Afrique de l'Est. Quoi qu'il en soit, la multiplication des sites acheuléens en Afrique du Nord donne de plus en plus envie d'y découvrir aussi des restes humains. Des fossiles d'*Homo habilis*? Ou d'*Homo ergaster*, plus évolué? Trop peu explorée jusqu'à présent, l'immense Algérie nous offrira peut-être bientôt de tels vestiges significatifs de l'histoire des humains. ■

François Savatier

M. Duval et al., *Quaternary Science Reviews*, vol. 271, article 107116, 2021



## EN BREF

### Éléphants sans défenses

À cause du trafic d'ivoire pendant la guerre civile du Mozambique (1977-1992), la population des éléphants dans ce pays a diminué de plus de 90 % sur cette période. Shane Campbell-Staton, de l'université Princeton, et ses collègues ont montré que le braconnage a aussi eu un effet sélectif : la part de femelles sans défenses est passée de 18,5 % avant la guerre à 33 % dans la première génération née après le conflit. Les chercheurs ont identifié deux gènes impliqués dans la formation des défenses.

Science, 22 octobre 2021

### Un lac martien confirmé

Le cratère Jezero, sur Mars, site d'atterrissage du rover *Perseverance*, révèle son passé aquatique. Grâce aux images des parois du cratère et l'analyse des roches sédimentaires par la caméra SuperCam du rover, Nicolas Mangold, du Laboratoire de planétologie et géodynamique, à Nantes, et ses collègues ont montré qu'il y a 3,6 milliards d'années, la région était un lac circulaire de 35 kilomètres de diamètre, atteignant plusieurs dizaines de mètres de profondeur et alimenté par une rivière.

Science, 7 octobre 2021

### Du tabac utilisé il y a 12 000 ans

Originnaire d'Amérique, le tabac est la substance psychoactive qui a eu le plus d'impact sur l'histoire humaine. Jusqu'à présent, les traces les plus anciennes de consommation étaient associées aux Mayas, il y a 3 000 ans. Or, sur le site archéologique de Wishbone, dans l'Utah, l'équipe de Daron Duke, du Groupe de recherche anthropologique de l'Ouest, au Nevada, a mis au jour des graines de tabac à moitié consommées datant de 12 300 ans, ce qui repousse de 9 000 ans cette histoire commune.

Nature Human Behaviour, 11 octobre 2021

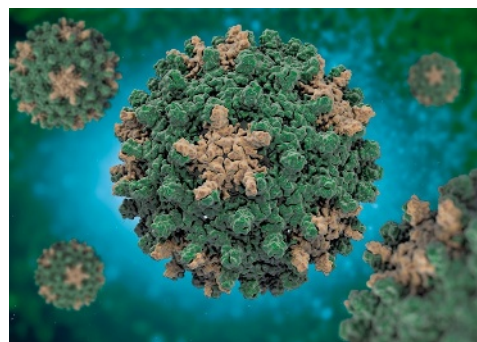
## VIROLOGIE

### HÉPATITE B : LES AVATARS DU VIRUS

Le virus de l'hépatite B (VHB) et l'humain, son principal hôte, partagent une longue histoire. En étudiant l'ADN viral présent sur des squelettes humains datant de 10 500 à 4 000 ans, Arthur Kocher, de l'institut Max-Planck de Iéna, en Allemagne, et son équipe ont retracé les grandes lignes d'une évolution intimement liée à celle des populations humaines.

Les chercheurs ont d'abord établi que le dernier ancêtre commun à tous les variants du virus datait seulement de la dernière période glaciaire, il y a 20 000 à 12 000 ans, c'est-à-dire bien après la sortie d'Afrique d'*Homo sapiens*. Une analyse phylogénétique a indiqué la suite de l'histoire.

Au début de l'Holocène, deux lignées de virus se séparent : la branche amérindienne et la branche eurasiennne. Les virus infectant les premiers Américains suivent leur propre évolution et conduiront, des milliers d'années plus tard, aux formes actuelles H et F. De son côté, l'évolution du VHB en Eurasie connaît plusieurs rebondissements, avec différents variants qui accompagnent certains grands épisodes de migration humaine. Au deuxième millénaire avant notre ère, le variant WENBA, qui s'était



Représentation tridimensionnelle du virus de l'hépatite B.

imposé pendant 4 000 ans, est supplanté à son tour par de nouvelles formes du virus : les formes A et D que nous connaissons aujourd'hui. Ces dernières sont plus virulentes que WENBA, grâce à la perte d'un morceau de leur ADN (36 nucléotides) dont dépend une protéine de surface. La propagation fulgurante de ces variants atteste de nouveaux mouvements migratoires. Une chose est désormais sûre : le virus de l'hépatite B se révèle être un précieux témoin des migrations des populations humaines à travers dix millénaires d'histoire. ■

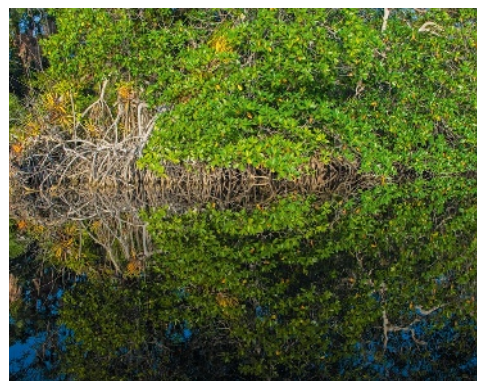
Coraline Madec

A. Kocher *et al.*, Science, vol. 374, pp. 182-188, 2021

## BIOLOGIE VÉGÉTALE

### UNE MANGROVE LOIN DE LA MER

Dans la péninsule du Yucatán, au Mexique, Carlos Burelo, de l'université Juárez autonome de Tabasco, au Mexique, et ses collègues ont découvert une mangrove à palétuviers rouges (*Rhizophora mangle*) qui subsiste depuis environ 125 000 ans en eau douce, à 170 kilomètres de la côte. Jusque-là, les botanistes considéraient que le palétuvier rouge, espèce pionnière des mangroves, était inféodé aux côtes marines et à la présence d'eau salée. Il s'ancre dans la vase grâce à ses imposantes racines-échasses en arceaux. Comment ces arbres sont-ils arrivés là ? L'équipe a utilisé une batterie d'analyses génétiques, géologiques et de modélisation du niveau de la mer pour retracer l'histoire de la mangrove. Elle a conclu qu'il s'agit d'un écosystème relictuel, qui a persisté depuis la dernière période interglaciaire quand, sous un climat plus chaud, la



La mangrove de palétuviers rouges sur la rivière San Pedro, à 170 kilomètres des côtes du golfe du Mexique.

mer était 6 à 9 mètres au-dessus du niveau actuel. L'océan s'est ensuite retiré, mais la mangrove a subsisté. Il reste à découvrir comment ce milieu s'est adapté aux nouvelles conditions environnementales. ■

Isabelle Bellin

O. Aburto-Oropeza *et al.*, PNAS, vol. 118(41), article e2024518118, 2021

# SUBLIMATION SOUS LES « ZEN STONES »

Sur le lac Baïkal, en hiver, de petits galets se retrouvent en équilibre sur une étroite colonne de glace. Ces *zen stones* («pierres zen»), tels des moines bouddhistes, semblent défier la pesanteur. Nicolas Taberlet et Nicolas Plihon, de l'École normale supérieure de Lyon et du CNRS, se sont intéressés aux processus physiques à l'origine de ces sculptures naturelles et éphémères. Il faut d'abord noter que le phénomène est rare et s'observe surtout sur le lac Baïkal. Les conditions climatiques particulières font que, à la fin de l'hiver, le lac est couvert de glace, jusqu'à quelques mètres d'épaisseur. En raison du vent, de la température moyenne (entre  $-30\text{ °C}$  et  $-10\text{ °C}$ ) et du très faible taux d'humidité, la glace ne fond pas, mais se sublime: la glace se transforme directement en vapeur quand elle reçoit la lumière du soleil. Or les rochers posés sur la glace agissent comme un parasol: l'ombre empêche la sublimation de la glace sous le caillou. Les chercheurs ont reproduit le phénomène dans des expériences de laboratoire en utilisant un lyophilisateur, qui permet d'atteindre des conditions de sublimation de la glace, et dans une simulation numérique.

«Quand on observe les photographies de *zen stones* naturelles, on constate la présence d'une dépression de la glace qui entoure le piédestal sous le galet, note Nicolas Plihon. Nous avons montré que ce phénomène est lié au rayonnement du caillou: il s'ajoute à celui reçu par l'atmosphère à proximité immédiate du galet et augmente localement le taux de sublimation.» ■

Sean Bailly

N. Taberlet et N. Plihon,  
PNAS, vol. 118(40), article e2109107118, 2021







© Shutterstock.com/Maria Mosyagina

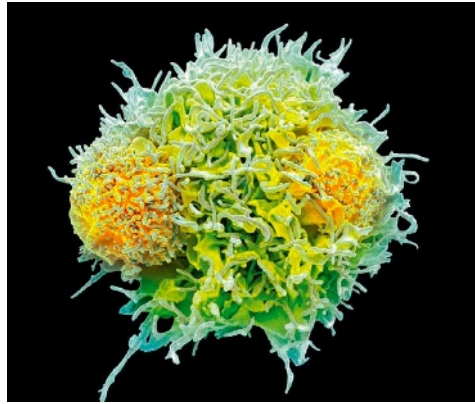


IMMUNOLOGIE

# COMMENT S'ÉPUISENT LES LYMPHOCYTES T

**A**u cours de leur lutte contre les infections chroniques et les cancers, les lymphocytes T s'épuisent et perdent progressivement leurs fonctions. Pierre Tonnerre, de l'institut de recherche Saint-Louis (Inserm et université de Paris), et ses collègues se sont attelés à comprendre les changements subis par ces acteurs du système immunitaire lors de cet épuisement dans le cas d'une infection au virus de l'hépatite C.

D'ordinaire, notre système immunitaire adaptatif développe une mémoire à long terme des infections passées. Lorsque l'une d'entre elles est vaincue, les lymphocytes T impliqués se différencient en lymphocytes T mémoire, qui pourront alors déclencher une réponse immunitaire accélérée dans le cas d'une nouvelle infection. Les chercheurs ont montré que l'épuisement cellulaire conduit à l'altération de l'expression de certains gènes. Les lymphocytes T ne jouent plus correctement leur rôle de mémoire, et le patient n'est



Un lymphocyte T vu en microscopie électronique à balayage et colorisé.

alors pas protégé de façon efficace contre une réinfection. Plus longue est l'exposition des lymphocytes T aux antigènes viraux, plus les dégâts sont importants et irréversibles. Mais une intervention thérapeutique en amont de ce processus d'épuisement serait en mesure d'empêcher l'altération définitive de leurs fonctions. ■

William Rowe-Pirra

P. Tonnerre et al., *Nature Immunology*, vol. 22, p.1030-1040, 2021

EN BREF

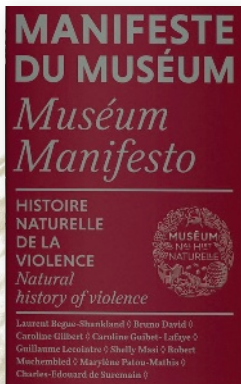
## Pas d'anoxie à l'Ordovicien

À la fin de l'Ordovicien, il y a 445 millions d'années, près de 85 % des espèces vivant dans les océans de faible profondeur ont disparu. Cet événement est l'une des cinq grandes extinctions du passé. Une des causes avancées est l'anoxie des océans – leur appauvrissement en oxygène. Or, grâce à des analyses d'échantillons de roches et des simulations, Alexandre Pohl, de l'université Bourgogne-Franche-Comté, et ses collègues ont montré que l'oxygénation n'a pas diminué dans les eaux de surface, contrairement aux eaux plus profondes. Cependant, ces indices s'accorderaient avec une importante baisse des températures. Reste à préciser le scénario de cette glaciation.

*Nature Geoscience*, 1<sup>er</sup> novembre 2021

# LISEZ LES MANIFESTES

Une collection d'ouvrages qui offrent un éclairage scientifique sur des sujets d'actualité.



NOUVEAUTÉ

## Histoire naturelle de la violence

Disponible en librairie à partir du 10 novembre 2021 - 7,50€

Le coffret collector "Les manifestes du Muséum" - 35€  
Plus d'infos sur [mnhn.fr](http://mnhn.fr)



## LES BIENFAITS DE LA LOUTRE DE MER

À cause de la chasse, les populations de loutres de mer (*Enhydra lutris*) avaient fortement diminué au large du Canada jusqu'à leur réintroduction au cours des cinquante dernières années. Erin Foster, de l'institut Hakai, au Canada, et son équipe ont constaté que ce retour a favorisé la diversité génétique d'herbes marines, les zostères. Ces algues se reproduisent par clonage ou par voie sexuelle. Or, pour se nourrir, les loutres de mer fouillent les prairies marines de zostères pour trouver des petites proies et favorisent ainsi la dispersion des graines. Cet exemple d'impact positif est une raison de plus pour protéger cet animal, classé comme espèce en danger par l'Union internationale pour la conservation de la nature. ■

Gaïa Jouanna

E. Foster *et al.*, *Science*, vol. 374, pp. 333-336, 2021

## UN PHASME DU PERMIEN MOYEN

Les phasmes sont des insectes qui ressemblent de façon spectaculaire à une brindille, une feuille ou une écorce. L'empreinte de *Phasmichnus radagasti*, un insecte mort il y a quelque 270 millions d'années, fait maintenant débiter leur histoire évolutive 30 millions d'années plus tôt qu'on ne le pensait, au Permien moyen. Antoine Logghe, du Muséum national d'histoire naturelle, et ses collègues l'ont découverte près de Gonfaron, dans le Var, sur un fragment de boue provenant d'un ancien fond de ruisseau argileux. Un film bactérien a préservé l'insecte longtemps, de sorte que son empreinte s'est finement enregistrée. Le corps étroit et la construction de *Phasmichnus* en font un phasme, ou du moins l'un des ancêtres des Phasmidés. Du reste, il ressemble de près à *Tropidoderus childrenii*, un phasme-feuille actuel, qui se dissimule très bien dans les eucalyptus de son Australie orientale natale. ■

F. S.

A. Logghe *et al.*, *Scientific Reports*, vol. 11, article 20774, 2021

## LE BERCEAU DES CHEVAUX DOMESTIQUES



Des chevaux dans une steppe d'Asie centrale. Leurs ancêtres étaient probablement originaires du nord du Caucase.

D'où venaient les ancêtres de nos chevaux? Ludovic Orlando, chercheur du CNRS à Toulouse, et une association de 162 paléogénééticiens, linguistes et autres archéologues viennent de montrer que les ancêtres du cheval domestique moderne sont originaires des steppes pontiques, au nord du Caucase, dans la région de la basse Volga et du Don.

Les chercheurs se sont procuré des vestiges de chevaux de toute l'Eurasie. Puis, au Centre d'anthropobiologie et de génomique de Toulouse et au Genoscope, à Évry, ils ont procédé à un séquençage *shotgun* (on « lit » de très nombreux fragments du génome, puis on les raboute informatiquement) des génomes de 273 chevaux ayant vécu entre 50 000 et 200 ans avant notre ère. Ils ont ainsi pu distinguer quatre groupes de chevaux. Un seul d'entre eux, particulièrement représenté dans les steppes d'Europe orientale, a diffusé dans toute l'Eurasie. Les données génétiques suggèrent que ce groupe, cantonné à l'origine aux steppes pontiques, se serait répandu à partir de 2200 avant notre ère jusqu'à remplacer, de l'Atlantique à la Mongolie, toutes les populations de chevaux sauvages.

De fait, les chercheurs ont relevé deux variants génétiques surreprésentés au sein du groupe: l'un, une modification du gène *GSDMC*, serait associé à une réduction du mal de dos des chevaux. L'autre, une modification du gène *ZFPM1*, serait associé à l'humeur. Selon les chercheurs, la combinaison des deux modifications va dans le sens de l'obtention de chevaux plus dociles et plus résistants. Ainsi, nos chevaux modernes descendent de chevaux dressés au nord du Caucase, qui ont essaimé en quelques siècles dans tout l'Ancien monde grâce à leur résistance au travail et à leur meilleur comportement. ■

F. S.

P. Librado *et al.*, *Nature*, vol. 598, pp. 634-640, 2021



## BIOLOGIE CELLULAIRE

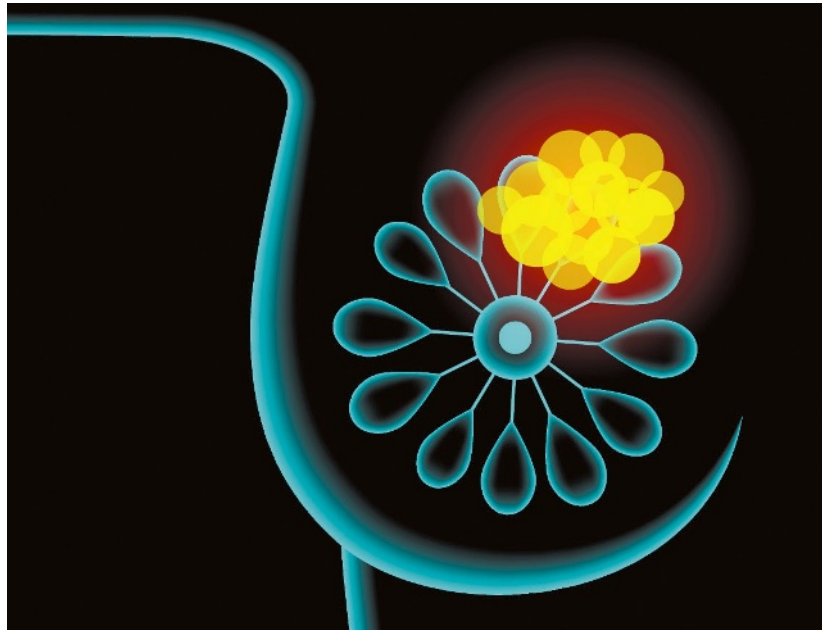
# DE LA RUPTURE DES NOYAUX CELLULAIRES AUX MÉTASTASES

Quand les noyaux de cellules tumorales se rompent, des réactions en cascade favorisent l'apparition de métastases.

**L**oin de la robustesse des coffres-forts, l'enveloppe des noyaux cellulaires, qui protègent l'information génétique stockée sous forme d'ADN et permettent sa bonne expression, est en fait une barrière fragile. Matthieu Piel, de l'institut Curie, et ses collègues viennent de montrer que des ruptures de cette enveloppe nucléaire pourraient accélérer le développement tumoral, en favorisant la dissémination des cellules cancéreuses. «Les ruptures des noyaux sont des événements fréquents, qui se produisent quand les cellules sont comprimées et déformées, en cas de migration ou de prolifération. Des mécanismes de réparation se mettent en place et cela est essentiel, car la rupture du noyau est délétère pour les cellules normales. Au contraire, dans des cellules tumorales, les ruptures nucléaires pourraient amplifier le développement de la tumeur», pointe le chercheur.

L'équipe a observé dans des carcinomes canaux (un type de cancer du sein localisé au départ dans les canaux lactiques), mais aussi dans des tumeurs du côlon, un nombre plus important de ruptures du noyau dans les cellules les plus mobiles, situées en périphérie de la tumeur, où les contraintes mécaniques sont les plus fortes. Ces ruptures sont associées à des détériorations de l'ADN. Pour comprendre comment ces constatations sont reliées, Matthieu Piel et ses collègues ont utilisé des dispositifs 2D qui permettent de soumettre des couches uniques de cellules à des contraintes, ce qui facilite l'observation des phénomènes qui en découlent.

La rupture d'un noyau met en contact son contenu avec des éléments présents dans le cytoplasme, la partie de la cellule qui entoure le noyau. Or on sait que quand la présence d'ADN est détectée dans le cytoplasme, comme lors de la rupture du noyau mais aussi lors d'une infection virale, plusieurs mécanismes se mettent en place. En présence d'ADN dans le cytoplasme, une protéine notée cGAS active la production de cytokines, qui jouent un rôle majeur dans l'élimination des agents pathogènes. Certaines enzymes, des nucléases, participent aussi à l'élimination de cet ADN mal localisé. Il en est ainsi de TREX1, dont l'activité régule celle de cGAS.



Dans certaines tumeurs malignes du sein, notamment, la rupture des noyaux des cellules n'est pas correctement gérée par la machinerie cellulaire. Ce phénomène favoriserait le développement de métastases.

Les chercheurs ont observé que dans des cellules normales, la rupture des enveloppes nucléaires et la dégradation de l'ADN par TREX1 engagent les cellules sur la voie de la sénescence et de la mort cellulaire. Dans les cellules tumorales, cependant, cette cascade d'événements active des enzymes de dégradation du collagène qui entoure la tumeur. Les cellules peuvent alors migrer plus facilement, ce qui risque de conduire à l'apparition de métastases.

Afin de tester ce modèle *in vivo*, les chercheurs ont greffé sur des souris des cellules tumorales humaines. En inactivant TREX1 dans ces cellules, ils ont constaté que les tumeurs ne se développent pas jusqu'au stade invasif. Le développement de molécules capables de bloquer TREX1 s'avère prometteur à double titre: ces molécules bloqueraient le processus de métastase tout en jouant sur le tableau de l'immunothérapie, puisque, en inhibant TREX1, elles stimulent le système immunitaire *via* cGAS. ■

Noëlle Guillon

G. Pedreira de Freitas Nader *et al.*, *Cell*, vol. 184, pp. 5230-5246, 2021

## UNE EXOPLANÈTE LOINTAINE

Les techniques utilisées pour traquer les exoplanètes ne sont efficaces qu'au sein de la Voie lactée. Comment observer des planètes plus lointaines? Rosanne Di Stefano, du centre d'astrophysique Harvard-Smithsonian, aux États-Unis, et ses collègues ont adapté la méthode du transit, fondée sur le passage de la planète devant son étoile hôte et l'occultation partielle qui en résulte. Ils ont analysé les émissions X de systèmes binaires composés d'une étoile normale et d'un corps compact (trou noir ou étoile à neutrons). La zone émettrice de rayons X étant limitée au disque de gaz chauffé autour du corps compact, l'exoplanète bloquerait une part importante de ce signal. Les astrophysiciens auraient ainsi repéré un transit dans la galaxie M51, distante de 28 millions d'années-lumière. ■

S. B.

R. Di Stefano *et al.*, *Nature Astronomy*, en ligne le 25 octobre 2021

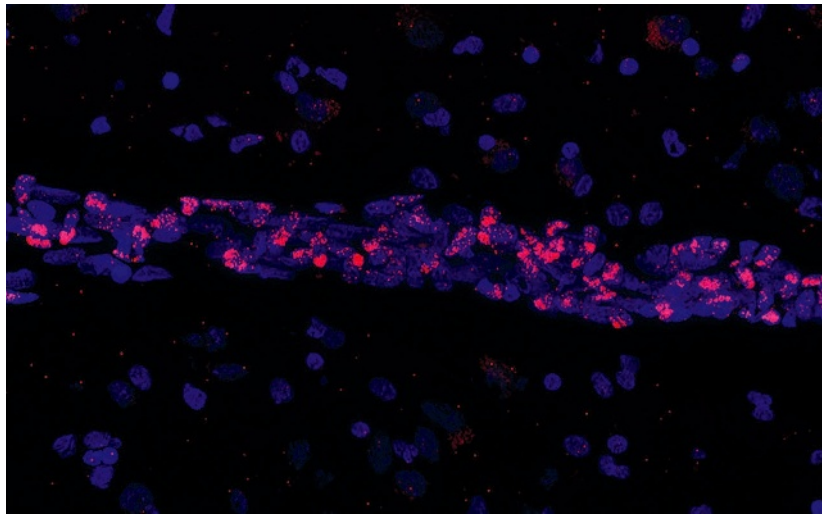
## LA COLLE RAPIDE DES MOULES

Les moules se fixent fortement aux rochers grâce à une biocolle. Cette substance qui résiste à l'eau de mer et aux contraintes mécaniques de la houle pourrait inspirer la conception de nouveaux adhésifs ou matériaux. Une équipe canado-allemande, menée par Tobias Priemel, de l'université McGill, à Montréal, vient d'éclaircir le mécanisme de sa formation. Les chercheurs ont montré que des protéines adhésives et des ions métalliques (fer et vanadium) sont sécrétés indépendamment et circulent dans un réseau de microvaisseaux. Les composés ne se rencontrent qu'au dernier moment et ne réagissent qu'à proximité immédiate de l'eau de mer, à la sortie des microvaisseaux, quand le pH passe de 2 à 8. Les protéines se lient alors entre elles par l'intermédiaire des ions fer et vanadium pour former un réseau très robuste. Le processus est rapide et efficace, et le bivalve adhère à son support en quelques minutes. ■

Martin Tiano

T. Priemel *et al.*, *Science*, vol. 374, pp. 206-211, 2021

## LES VAISSEAUX FANTÔMES DU CERVEAU



Dans un cerveau humain dont tous les noyaux cellulaires sont révélés par fluorescence (en violet), on distingue un vaisseau sanguin (au centre) dans lequel les cellules endothéliales vasculaires produisent des virus SARS-CoV-2 (en rose).

Peu après l'apparition du virus du Covid-19, le SARS-CoV-2, des questions sur ses potentiels effets sur le cerveau et la circulation sanguine se sont posées. Markus Schwaninger, de l'université de Lübeck, en Allemagne, avec des équipes françaises et espagnole ont répondu à certaines d'entre elles en montrant comment ce coronavirus endommage la barrière hématoencéphalique.

Cette frontière entre la circulation sanguine et le système nerveux central est notamment constituée de capillaires dont les cellules endothéliales tapissent la paroi. Cependant, ces cellules sont dotées des récepteurs que reconnaît le coronavirus. Quand celles-ci sont infectées, le génome viral est traduit en deux grosses protéines, des polyprotéines, qui sont ensuite découpées en protéines fonctionnelles grâce à une enzyme, la protéase M<sup>pro</sup> du virus. Mais cette dernière reconnaît aussi NEMO, une protéine des cellules endothéliales, et la coupe.

Sans NEMO, la voie de signalisation à laquelle cette protéine participait ne fonctionne plus: d'autres prennent le pas, comme celles fondées sur les enzymes RIPK1 et RIPK3 qui déclenchent la mort des cellules endothéliales. Peu à peu, ces dernières disparaissent, laissant place à des lacunes par où le sang s'écoule. Les capillaires ne sont plus fonctionnels et disparaissent: seuls subsistent les composants qui les entouraient, créant ainsi des «vaisseaux fantômes».

Ce n'est pas forcément grave, pour deux raisons. D'abord, des médicaments prescrits contre une maladie rare, l'incontinentia pigmenti, et ciblant RIPK3 et RIPK1 empêchent la mort des cellules endothéliales. Ensuite, chez les hamsters, les vaisseaux fantômes reviennent à la vie: les dégâts causés sont réversibles. Reste à savoir s'il en est ainsi chez l'humain... ■

Loïc Mangin

J. Wenzel *et al.*, *Nature Neuroscience*, vol. 24, pp. 1522-1533, 2021

## LES PRIX NOBEL 2021

## CHIMIE

## L'ORGANOCATALYSE

Les prix Nobel aussi ont leurs marronniers. Celui de chimie vient de mettre à l'honneur un champ de recherche déjà distingué sept fois: la catalyse. Au <sup>xx</sup> siècle, on utilisait deux types de catalyseurs pour accélérer ou ralentir les réactions chimiques: des métaux et des enzymes. Mais en 2000, les chimistes récompensés, Benjamin List, de l'institut Max-Planck pour la recherche sur le charbon, en Allemagne, et David MacMillan, de l'université Princeton, aux États-Unis, ont montré qu'une troisième voie était possible, l'organocatalyse. De petite taille et minimalistes (constitués d'atomes de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et d'azote), leurs catalyseurs se sont révélés très performants et simples à fabriquer. Leur utilisation a explosé. ■

Marie-Neige Cordonnier

<https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2021>

## PHYSIOLOGIE/MÉDECINE

## LES RÉCEPTEURS DE LA TEMPÉRATURE ET DU TOUCHER

Manger un piment, un bonbon à la menthe... On associe souvent les sensations ressenties à ces occasions au chaud ou au froid. Ce n'est pas étonnant, car l'un des deux lauréats du prix Nobel, David Julius, de l'université de Californie à San Francisco, a montré que le récepteur TRPV1 activé par la capsaïcine, le principe actif des piments, est aussi sensible à la chaleur tandis que le récepteur TRPM8 est sensible au menthol et au froid.

L'autre lauréat, Ardem Patapoutian, de l'institut de recherche Scripps, à La Jolla, en Californie, a quant à lui identifié les récepteurs Piezo1 et Piezo2 (du grec *piezo*, «pression»). Enchâssés dans la membrane d'un neurone, ils se déforment lorsqu'une force mécanique s'exerce sur eux et déclenchent un signal électrique.

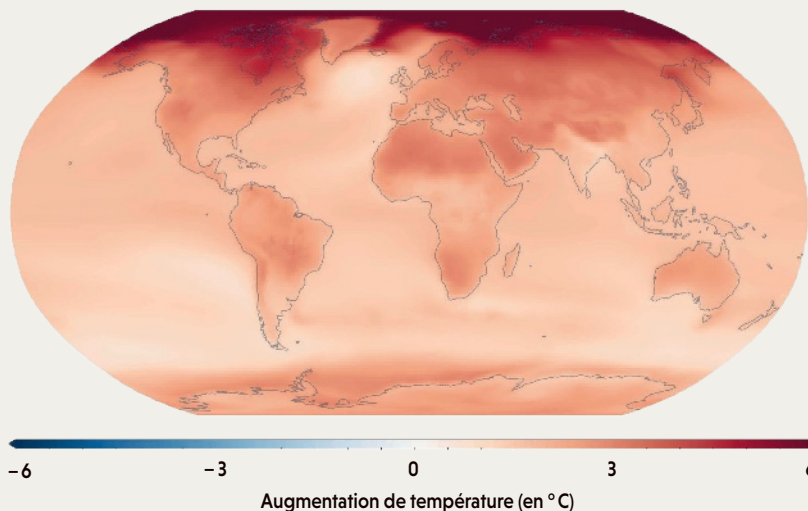
Selon le comité Nobel, ces découvertes aideront à lutter contre diverses pathologies, et particulièrement celles qui se traduisent par des douleurs chroniques. ■

L. M.

<https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/2021>

## PHYSIQUE

## L'ÉTUDE DES SYSTÈMES COMPLEXES



Cette carte représente les projections sur l'augmentation de la température moyenne annuelle en 2041-2060 par rapport à la période 1850-1900. Elle a été obtenue à partir de 34 modèles (CMIP6) suivant le scénario SSP5-8.5. Les travaux précurseurs de Syukuro Manabe et Klaus Hasselmann ont permis de développer des simulations du climat d'un système aussi complexe que la Terre.

Y a-t-il une question plus urgente aujourd'hui que celle du réchauffement climatique? Le comité Nobel a semble-t-il choisi de mettre en avant cet enjeu en décernant la moitié du prix à Syukuro Manabe, de l'université Princeton, aux États-Unis, et Klaus Hasselmann, de l'institut Max-Planck de météorologie, à Hambourg, en Allemagne, pour leurs travaux fondateurs sur la modélisation physique du climat, la quantification de sa variabilité et les prédictions fiables relatives au réchauffement climatique.

La Terre est un exemple de système complexe comme il en existe tant d'autres. Ces systèmes sont caractérisés par le fait qu'ils mettent en jeu de nombreuses composantes dont les interactions rendent l'étude difficile. Il est souvent ardu de les décrire mathématiquement à l'aide d'équations. En plus d'être désordonnés, ces systèmes sont parfois chaotiques, à l'image de la météo, où de petites fluctuations initiales peuvent conduire à de grandes variations au fil du temps.

Les modélisations actuelles les plus poussées sur le climat, celles qui ont permis au Giec d'écrire les lignes de son sixième et plus récent rapport, sont en partie bâties sur les travaux de Syukuro Manabe et Klaus Hasselmann. Ils partagent le prix Nobel avec Giorgio Parisi, de l'université Sapienza de Rome, qui s'est intéressé à la physique statistique d'un autre type de systèmes complexes, les «verres de spin», où le désordre et les fluctuations jouent un rôle essentiel. C'est par exemple le cas d'un alliage où quelques atomes de fer sont incorporés à du cuivre. Selon les interactions des atomes de fer, les propriétés magnétiques du matériau changent. Giorgio Parisi a mis au point des méthodes théoriques pour étudier les verres de spin et révéler leurs propriétés, méthodes qui ont été appliquées à bien d'autres systèmes complexes. ■

S. B.

<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2021>

# cité

sciences  
et industrie

# conférences

## les récits

cycles thématiques,  
tables rondes, projections

septembre 2021  
— janvier 2022



accès gratuit  
cite-sciences.fr  
M > Porte de la Villette

en partenariat avec



avec le soutien de



Les conférences vous donnent 30 rendez-vous, les mardis et jeudis, à l'auditorium de la Cité des sciences et de l'industrie, et sur YouTube. En janvier, ne manquez pas :

## Cycle *Anthropocène* : *des récits en questions*

avec le soutien de *Cerveau & psycho*

Le terme anthropocène caractérise la période où l'influence des humains sur la planète a atteint un tel niveau qu'elle est devenue une « force géologique ». Ce concept nourrit l'imaginaire et suscite des récits qui posent questions.

Ce cycle invite à poser un regard critique sur trois d'entre eux : la transition énergétique et écologique, les stratégies mises en place pour défendre les milieux de vie, la généalogie de l'idée de « nature ».

## La transition, un récit qui façonne nos imaginaires ?

mardi 4 janvier à 19h

Avec **Jean-Baptiste Fressoz**, historien des sciences, des techniques et de l'environnement, chercheur au CNRS.

## Australie, Guyane, Notre-Dame-des-Landes : des actions pour réveiller les esprits de la Terre

mardi 11 janvier à 19h

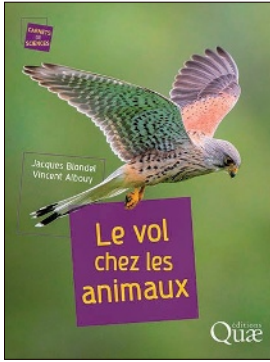
Avec **Barbara Glowczewski**, anthropologue, directrice de recherche au CNRS.

## La nature : histoire d'une idée

mardi 18 janvier à 19h

Avec **Frédéric Ducarme**, chercheur associé en philosophie et en écologie, Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN).





**BIOLOGIE ANIMALE**

**LE VOL CHEZ LES ANIMAUX**

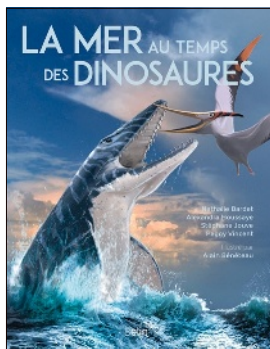
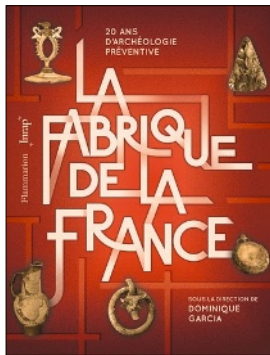
Vincent Albouy  
et Jacques Blondel  
Quæ, 2021  
160 pages, 23 euros



**GÉOSCIENCES**

**ALPES**

Samuel Bitton, Ambre de l'Alpe  
et Roberto Moiola  
La Salamandre, 2021  
224 pages, 39 euros



**V**oler de ses propres ailes est, depuis très longtemps, un rêve humain. Il s'est accompli en partie au début du xx<sup>e</sup> siècle grâce à des machines volantes, mais sans nous donner la finesse du vol des animaux volateurs, même si nos avions ont des performances de vitesse et de portée que n'atteignent pas les animaux.

Pour petit qu'il soit, ce livre est très riche et beau. Il nous fait entrer dans le passé profond du vol animal. Par mille photographies et autres schémas bien placés, la mécanique du vol des différents volateurs y est très clairement expliquée. Sont abondamment illustrés la diversité des vols ainsi que les avantages et inconvénients de chaque type – les oiseaux ont par exemple «sacrifié» leur capacité à acquérir des mains préhensiles, alors qu'elles étaient potentiellement présentes chez leurs ancêtres dinosauriens. Les auteurs expliquent aussi les contraintes et les solutions spectaculaires apportées au problème du vol par quatre grands groupes animaux (insectes, oiseaux, ptérosaures et chauve-souris) au cours des derniers 300 millions d'années de conquête du ciel. Le chapitre final sur le biomimétisme du vol montre tout l'intérêt d'observer la nature pour s'en inspirer.

Dans mon domaine, la paléontologie, je n'ai pu m'empêcher de relever quelques détails discutables: les insectes fossiles ne sont pas rares; leur histoire, notamment celle de leurs ailes, est de mieux en mieux connue; et le Silurien (il y a 443 millions à 419 millions d'années) ne nous a pas laissé de fossiles d'insectes! Un spécialiste y est sensible, mais ces détails n'effacent pas l'intérêt d'un ouvrage qui révèle la diversité du vol chez les animaux et montre l'intérêt essentiel que nous avons à la préserver.

**ANDRÉ NEL**  
Muséum national d'histoire naturelle, Paris

**T**rois photographes ivres d'altitude et sept scientifiques nous racontent les Alpes, en décryptant les paysages photographiés et en révélant leurs messages secrets. Cette collaboration entre artistes et scientifiques de diverses disciplines a produit un «beau livre» au riche contenu, dans une approche percutante et originale.

L'ouvrage fait l'effet d'un grand bol d'air. Il dévoile des Alpes comme on ne les a encore jamais vues. Conçue en quatre grandes parties au rythme des saisons, l'œuvre est superbement illustrée, facile et agréable à lire, didactique et limpide. Plus qu'un livre de photographies, c'est le regard croisé de trois photographes de talent qui n'ont pas hésité à aller aux limites du possible pour nous rapporter des images à couper le souffle, prises en France, en Suisse, et en Italie. Ces vues mettent en lumière des régions mondialement renommées, mais aussi des lieux méconnus et fragiles.

De nombreux encadrés nous éclairent sur l'état des lieux et la dégradation de l'environnement par le réchauffement climatique. Le tout dans la perspective du juste témoignage, sans catastrophisme ni dogmatisme. On a coutume de dire qu'il n'y a qu'une constante: le changement. Changement au rythme des saisons, mais aussi des temps géologiques, voire du «temps climatique» qui aujourd'hui accélère tout. Le lecteur aura entre les mains un véritable outil pour découvrir cette chaîne de montagnes, la comprendre et s'en émerveiller.

**MICHEL DETAY**  
Géologue et volcanologue indépendant



## ARCHÉOLOGIE

### LA FABRIQUE DE LA FRANCE

Dominique Garcia (dir.)

Flammarion/Inrap, 2021  
320 pages, 29 euros

L'Institut national de recherches archéologiques préventives (Inrap) a pour principale vocation de dévoiler les restes archéologiques tout en sauvant les informations qu'ils recèlent. Il pallie ainsi les destructions patrimoniales dues aux quelque 700 kilomètres carrés affectés chaque année par les travaux d'aménagement en France. L'établissement produit cette année un séduisant livre anniversaire. Son président, Dominique Garcia, est ici chef d'orchestre pour présenter un panorama diversifié des grands moments archéologiques.

Le livre survole 200000 ans d'histoire humaine sur le territoire français. Dans une acception aujourd'hui désuète, la fabrique désignait autrefois une petite construction de pierre pseudo-antique dans un jardin à usage romantique, pour rêver et susciter l'imagination. C'est bien de fabriques qu'il s'agit ici avec des épisodes méconnus, étonnants, voire détonants, du passé de ce territoire, mis au jour par les archéologues. Dominique Garcia rappelle pourtant à juste titre que l'archéologie présentée n'est plus une « science du rêve », mais bien une discipline scientifique.

Cette collection de fabriques révèle de passionnants pans du passé, depuis les heures de gloire gallo-romaine de Reims jusqu'à la tragédie coloniale des esclaves de l'îlot de Tromelin, au large de Madagascar. On découvre aussi les relations intimes entre humains et mammouths et l'on navigue sur la réplique expérimentale d'un antique bateau. Enfin, il faut saluer les superbes photographies parsemant l'ouvrage. Ce livre magnifie la longue histoire du pays par le truchement de traces fugaces des peuples qui ont investi cet espace à l'origine de la France actuelle.

**STÉPHEN ROSTAIN**  
Archéologie des Amériques  
(CNRS-université Paris I)

## PALÉONTOLOGIE

### LA MER AU TEMPS DES DINOSAURES

Nathalie Bardet, Alexandra  
Houssaye, Stéphane Jouve  
et Peggy Vincent ; illustré  
par Alain Bénéteau

Belin, 2021  
208 pages, 26 euros

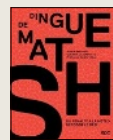
Dans la mer, au temps des dinosaures, il n'y avait pas de dinosaures ! Quand les paléontologues l'affirment, cela suscite souvent un certain étonnement : les océans du Mésozoïque n'abritaient-ils pas nombre de « grands reptiles », ichthyosaures, plésiosaures et autres mosasaures ? Certes, mais ce n'étaient pas des dinosaures : ils appartenaient à des groupes zoologiques bien différents, dont beaucoup sont éteints aujourd'hui, même si tortues et crocodiles ont survécu.

Ce livre, écrit par des spécialistes en la matière, nous présente ces faunes marines qui ont peuplé les mers jusqu'à ce que l'impact météoritique d'il y a 66 millions d'années mette un terme à leur évolution, ouvrant ainsi la voie aux écosystèmes marins bien différents d'aujourd'hui. Pour raconter cette longue histoire, qui débute à la fin du Paléozoïque, il y a plus de 250 millions d'années, lorsque certains vertébrés terrestres ont commencé à investir le milieu marin, les aspects géologiques et biologiques sont évoqués de façon très équilibrée, avec aussi de fréquentes allusions à l'histoire des sciences.

En plus de découvrir des créatures souvent étranges et pas très connues du public, le lecteur est invité à voyager à travers le monde, de la Chine à l'Australie en passant par le Maroc, la Suisse et l'Angleterre, pour visiter quelques grands sites paléontologiques qui livrent les fossiles souvent spectaculaires à partir desquels les chercheurs racontent l'histoire évolutive mouvementée des vertébrés marins. Le livre est richement illustré, avec des reconstitutions d'Alain Bénéteau qui font magnifiquement revivre ces êtres disparus. La paléontologie, fort heureusement, ce n'est pas seulement les dinosaures ; ce très bel ouvrage en témoigne brillamment.

**ERIC BUFFETAUT**  
Laboratoire de géologie, ENS-CNRS, Paris

## ET AUSSI



### DINGUE DE MATHS

Avner Bar-Hen et Quentin Lazzarotto

EPA, 2021  
352 pages, 35 euros

Décrypter la réalité : tel est l'angle sous lequel les auteurs décrivent avec délectation mille applications des mathématiques. D'autres sciences sont parfois convoquées, mais c'est toujours la nature des calculs ou celle du problème mathématique associé qui sont discutées. Il en est ainsi des divers calculs « simples » sous-tendant le GPS, le dilemme du gardien de but en théorie des jeux, la modélisation du trafic routier, les calculs en dessin technique ou d'art, etc. Éclectique et bien illustré. Un régal.

### ÉTONNANTS RÉCIFS

Laetitia Hédouin (dir.)

CNRS, 2021  
300 pages, 24 euros

Voici de quoi découvrir ces écosystèmes qui constituent le plus grand réservoir de biodiversité marine de la planète, par le biais de 170 images somptueuses, mais aussi près de 80 textes courts. Écrits par des acteurs scientifiques de l'étude et de la protection des récifs, notamment polynésiens, ces textes évoquent notamment l'expérience d'un jardinier de corail, des créateurs de récifs artificiels, le rôle des poissons, celui des diatomées...

### LE RADEAU DES CIMES

D. Cleyet-Marrel, G. Ebersolt,  
F. Hallé et O. Pascal

Actes Sud, 2021  
288 pages, 36 euros

Les auteurs ont exploré trente ans durant la canopée des forêts tropicales primaires, où se trouve la plus forte biodiversité du monde. Dès 1985, ils testaient sur une forêt d'épicéas peu accueillante le premier « radeau des cimes ». Puis ils ont exploré les cimes de nombreuses forêts, au-dessus desquelles ils transportaient leurs radeaux à l'aide d'aérostats. Ils décrivent ici leur aventure par de spectaculaires images et par des textes fourmillant d'anecdotes, avec un bienvenu résumé des résultats scientifiques obtenus. La naissance d'une méthode scientifique majeure en images et en mots.

DE 9 À 99 ANS

**LA BOÎTE À CURIOSITÉS  
UNE AVENTURE DRÔLE ET INSOLITE  
AU CŒUR DU VIVANT**

Marie Treibert  
De Boeck, 2021  
176 pages, 19,90 euros



La curiosité, un vilain défaut ? Au contraire, plaide la youtubeuse Marie Treibert, aux manettes de la chaîne et du blog «La Boîte à curiosités». Voilà le meilleur moteur pour se questionner, enquêter, chercher à comprendre... Bref, pour développer son savoir. Avec humour et de jolis dessins frais et colorés dont elle est l'auteurice, Marie fait partager aux jeunes et aux moins jeunes qui ne seraient pas experts en sciences naturelles ses découvertes insolites sur le monde du vivant. Des pétoquettes (nom des crottes de chèvre) aux pigeons capables de distinguer une toile de Monet d'un tableau de Picasso, en passant par le secret de la couleur des hortensias. Au-delà des anecdotes, Marie Treibert aborde des questions essentielles (par exemple, peut-on définir la nature?), initie à la théorie de l'évolution, aborde des notions comme les biomes, les microbiotes, le cycle de l'eau... sans oublier de donner quelques repères d'histoire des sciences. La fin du livre est consacrée à l'impact de l'homme sur la planète, un constat peu réjouissant, bien sûr, mais éclairé par quelques conseils pour limiter les dégâts, dont le plus fondamental : pour comprendre ce qu'il se passe et agir au mieux, rester curieux! ■

EN CLASSE OU EN FAMILLE

**LES SCIENCES  
EN S'AMUSANT**

Tania Louis  
De Boeck, 2021  
96 pages, 15 euros



Voici un livre qui s'adresse aux petits chercheurs en herbe *via* leurs professeurs des écoles ou *via* leurs parents en demande d'activités scientifiques à

réaliser à la maison. Protocoles, astuces, explications des phénomènes observés : les adultes trouveront là de quoi organiser quarante ateliers de chimie, physique et biologie fort ludiques comme l'arc-en-ciel de bonbons, le café qui chante ou le chou multicolore. En prime : la moitié des manips sont visibles en vidéo grâce au talent pédagogique de Tania Louis, médiatrice scientifique aguerrie. ■

DÈS 13 ANS

**LES DÉCODEUSES  
DU NUMÉRIQUE**

Léa Castor, Célia Esnault,  
Laure Thiébaud  
CNRS, 2021  
64 pages, 6 euros



Magalie, Claire, Nina, Sarah... Douze chercheuses, ingénieures ou enseignantes-chercheuses dans le domaine des sciences

numériques se livrent au jeu du portrait : grâce au crayon enjoué de Léa Castor, elles racontent leur parcours, la passion qui les anime, les embûches qu'elles ont parfois rencontrées et leur travail au quotidien. C'est drôle et pertinent et le message est clair : oui, les femmes ont toute leur place dans ce domaine, où pourtant elles dépassent à peine le quart des effectifs. À offrir à toutes les jeunes filles qui se posent des questions sur leur avenir. ■

7 ANS ET +

**EXPÉRIENCES POISSEUSES  
ET PUANTES**

Kris Hirschmann  
Ill. : Santy Gutierrez  
Delachaux & Niestlé, 2020  
64 pages, 13,90 euros



Ce petit livre d'activités nous avait échappé à l'automne dernier confiné. Mais il est tellement irrésistible que

nous vous le recommandons cette année. Momifier un poisson, élever des vers de terre, faire moisir son pain, suivre ses prouts à la trace... Autant d'expériences qui enchanteront les enfants pendant les vacances de Noël. Pour donner le goût des sciences aux plus jeunes, tous les moyens sont bons, n'est-ce pas ? ■

À PARTIR DE 7 ANS

**LA VOIX  
COMMENT ÇA MARCHE ?**

François et Magali Le Huche  
Gallimard Jeunesse, 2021  
72 pages, 13,90 euros

Pourquoi la voix des ados mue ? Comment fait-on pour chanter juste ? Pourquoi parle-t-on du nez quand on est enrhumé ? Peut-on changer de voix ? Ce petit livre au sujet original, répond à toutes ces questions avec humour et précision. Écrit par un médecin phoniatre et illustré par sa fille, il donnera aux jeunes profanes une foule d'informations. Par exemple que la voix est un instrument à vent dont le fonctionnement se rapproche



de celui de la trompette. Ou que les cordes vocales ne ressemblent pas du tout à des cordes mais... à des lèvres! ■

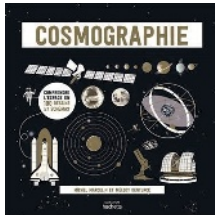
## POUR TOUTE LA FAMILLE

### COSMOGRAPHIE

Michel Marcelin  
Ill. : Mélody Denturck  
Hachette, 2021  
128 pages, 19,95 euros

Sur le cosmos, une question relativement simple (pourquoi y a-t-il des saisons?) ou plus savante (qu'est-ce que l'horizon cosmologique?) ou encore plus ludique (le premier pas de Tintin sur la Lune est-il réaliste?) émerge au moment du dîner familial...

Ce joli livre écrit par l'astrophysicien Michel Marcelin y répondra de façon concise et précise. La qualité des schémas et des illustrations est pour beaucoup dans la qualité pédagogique. ■



## DÈS 6 ANS

### UN CANARD À LA MER!

Markus Motum  
Delachaux & Niestlé, 2021  
32 pages, 13,50 euros



C'est une vraie histoire qui étonnera petits et grands: en 1992, un conteneur

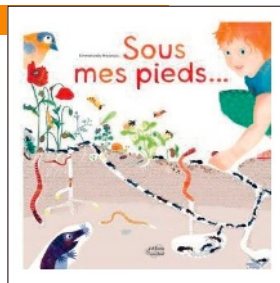
transportant 29000 canards en plastique jaune tombe à la mer. Dix mois plus tard, les premiers jouets apparaissent au large des côtes de l'Alaska, puis en Europe ou encore à Hawaii. Une aventure qui raconte le crucial problème des déchets plastiques qui polluent les océans. Mais qui permettra aussi aux chercheurs de modéliser certains courants marins! ■

## DÈS 3 ANS

### SOUS MES PIEDS

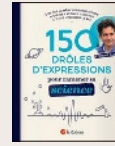
Emmanuelle Houssais  
Le Ricochet, 2021  
36 pages, 16 euros

Il s'en passe, des choses, sous la terre! Entre fourmis, cloportes, chenilles, taupes ou vers de terre... Ça grouille drôlement. Une jolie initiation des petits à la vie fascinante dans le sol. ■



Pages réalisées par Cécile Lestienne

## SPÉCIAL LYCÉE ET AU-DELÀ



### 150 DRÔLES D'EXPRESSIONS POUR RAMENER SA SCIENCE avec Étienne Klein

Le Robert, 2021, 320 pages, 12,90 euros

Un livre qui met sur la même longueur d'onde scientifiques et littéraires, pas besoin d'avoir fait Polytechnique pour trouver ça nickel chrome... Les lecteurs potasseront avec plaisir ce recueil quasi tombé du ciel qui leur permettra en un rien de temps de faire des étincelles en société en ramenant leur science, sans pomper l'air de personne, ni commettre d'impair. Nickel chrome, on vous dit!

### LE TRÔNE DE FER ET LES SCIENCES

Sous la dir. de Jean-Sébastien Steyer  
Belin, 2021, 256 pages, 32 euros

Peut-être les adolescents d'aujourd'hui connaissent-ils mieux la célèbre saga *Le Trône de fer* sous le nom de *Game of Thrones*, du titre de la série télévisée à succès, adaptée des romans de George R. R. Martin. Pour les fans, ce livre des plus sérieux donne toutes les clés scientifiques pour éclairer autrement cet univers de *fantasy*. D'éminents spécialistes (d'histoire des langues, de géographie, géologie, biologie, psychologie, climat...) mettent leur savoir au service d'un décryptage qui manquait. Attention, le propos, assez ardu, séduira les plus scientifiques des jeunes lecteurs (ou leurs parents).

### LE MONDE SANS FIN

Christophe Blain et Jean-Marc Jancovici  
Dargaud, 2021, 196 pages, 27 euros

La question du climat et des énergies est cruciale, c'est entendu. Mais c'est parfois rasoir, avouons-le. Le binôme de l'expert Jean-Marc Jancovici et du dessinateur Christophe Blain réussit ici l'exploit de rentrer dans ce sujet complexe avec rigueur et précision mais de façon claire grâce à moult métaphores, schémas... et une bonne dose d'humour, qui mêle Iron Man, Mère Nature et la loi de conservation de l'énergie pour expliquer que notre exploitation du charbon, gaz et autre pétrole nous a permis de créer un monde où le labeur et la pauvreté ont été fortement réduits. Mais que ces mêmes énergies carbonées nous mènent aujourd'hui dans une impasse. Pas d'accablement pourtant après cette lecture : plutôt l'envie de se retrousser les manches!





La chronique de  
**CATHERINE AUBERTIN**

économiste de l'environnement, directrice de recherche  
de l'IRD et membre de l'UMR Paloc  
au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris

## UN ZÉRO FALLACIEUX

**Biodiversité, climat : les jeux de compensation ne font pas leurs preuves et retardent les prises de conscience.**



Une centrale à charbon en République tchèque. Le droit d'émettre du CO<sub>2</sub> en contrepartie d'une action (plantation d'arbres, par exemple) destinée à en capter? De tels mécanismes de compensation n'ont jusqu'à présent pas permis de réduire les émissions.

**A**tteindre la neutralité carbone, parvenir à zéro perte de biodiversité, à zéro déforestation... Ces objectifs figurent dans toutes les politiques environnementales ainsi que dans leurs déclinaisons juridiques. Il s'agit de ne plus demander à la nature davantage qu'elle ne peut supporter.

Pourtant, l'effondrement de la biodiversité se poursuit, et aucun des vingt objectifs fixés en 2010 par la Convention sur la diversité biologique n'a été tenu. Quant à la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, cause première du réchauffement, elle a augmenté de 60% depuis la signature de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (1992), et les plans de relance post-Covid poussent à de nouveaux records historiques d'émissions de gaz à effet de serre.

Comment expliquer l'entêtement des États à reporter des objectifs régulièrement non tenus? On peut accuser le manque de volonté des gouvernants. La multiplication des procès pour inaction

qui leur sont intentés en témoigne. Mais une explication ne tiendrait-elle pas dans la signification du zéro invoqué, qui n'en est pas vraiment un? Il s'agit en effet d'un jeu de compensation, d'un «zéro net».

Le zéro net apparaît  
comme une astuce  
comptable et dépolitisée

Par exemple, la loi française pour la biodiversité oblige les personnes qui ne pourraient ni réduire ni éviter leurs impacts nocifs à acquérir des «unités de compensation» créées par des opérateurs de restauration écologique. Le code forestier brésilien va plus loin et fait de ces unités un marché où s'échangent droits de déboiser contre mises en réserves.

Concernant le climat, l'accord de Paris signé à la COP21, en 2015, engage les États à «parvenir à un équilibre entre

les émissions anthropiques par les sources et les absorptions anthropiques par les puits de gaz à effet de serre au cours de la deuxième moitié du siècle». Cela peut paraître ironique quand le dernier rapport du Giec (août 2021) alerte sur la perte de capacité d'absorption des puits de carbone naturels, océaniques comme terrestres, du fait du réchauffement. La technologie est censée s'y substituer: les puits «anthropiques» permettront de réaliser des «émissions négatives» en captant et en stockant le carbone dans les failles géologiques, dans les sols ou grâce à des plantations forestières, ainsi que par le recours aux projets fantasmagoriques de la géo-ingénierie. Ces émissions négatives s'échangent sur les marchés de crédits carbone.

Mais voilà, ces innovations technologiques, quand elles sont disponibles, n'ont pas fait leurs preuves, pas plus que les marchés des droits à polluer ou à déboiser. Il faudrait par exemple planter d'arbres une surface équivalant à toutes les terres agricoles de la planète pour compenser les émissions, et ces plantations ne remplaceront pas tous les services rendus par les forêts. Plus globalement, les coûts économiques de ces «solutions», leurs impacts sur la biodiversité, leur désirabilité sociale et leurs implications politiques sont peu étudiés.

Le zéro (net) autorise ainsi la poursuite de la croissance en laissant à d'improbables innovations technologiques le soin de remédier au réchauffement climatique et à l'effondrement de la biodiversité. Il apparaît alors comme une astuce comptable, dépolitisée, qui retarde la prise de conscience de l'urgence à modifier nos modes de vie.

Finalement, si les objectifs ne sont pas atteints, n'est-ce pas du fait de cette persistance à croire que l'on peut gagner des deux côtés, une croissance économique et une planète préservée? Le zéro net entretient l'utopie du gagnant-gagnant. Si l'humanité ne veut rien lâcher, devinez qui sera perdant? ■





© G. E. Lodge (1860-1934), et H. Greenwood (1858-1940), « Male Cuckoos fighting before the arrival of a female », in H. Ester Howard (1877-1942), Territory in Bird Life, 1920, Creative Commons, Washington, Smithsonian Library.



# TRIBUNES

## HISTOIRE NATURELLE DE LA VIOLENCE

Samedi 4 décembre 2021

**JARDIN  
DES PLANTES**  
PARIS

TRIBUNE JUNIOR  
De 10h à 12h  
TRIBUNES  
De 15h à 17h

GRATUIT  
Réservation  
obligatoire  
[billetterie.mnhn.fr](http://billetterie.mnhn.fr)

Pour la  
**Science**





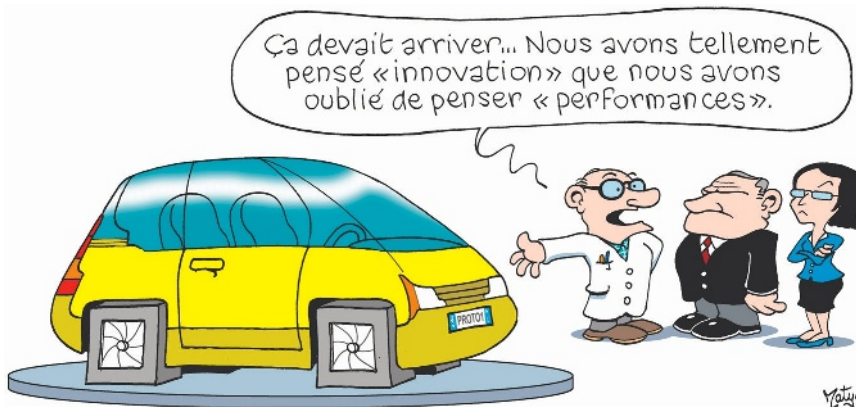


La chronique de  
**YVES GINGRAS**

professeur d'histoire et sociologie des sciences  
à l'université du Québec à Montréal, directeur scientifique  
de l'Observatoire des sciences et des technologies, au Canada

# L'INNOVLANGUE, OU LE DISCOURS CREUX DE L'INNOVATION

Dans maints textes et discours officiels, le mot « innovation » se voit dépouillé de toute signification précise et devient ainsi une vaine incantation.



**S**ensible à l'importance de la précision du langage pour exprimer la pensée, l'écrivain Georges Orwell a, dans son roman d'anticipation 1984, identifié les dangers de l'usage de ce qu'il a nommé le *Newspeak*, la (ou le) « novlangue ». Comme l'affirme l'un de ses personnages – un fonctionnaire –, « le véritable but [de la] novlangue est de restreindre les limites de la pensée ». À terme, ajoute-t-il, tous les concepts nécessaires à la pensée « seront exprimés chacun exactement par un seul mot dont le sens sera délimité ». Ainsi, il y aura « chaque année, de moins en moins de mots, et le champ de la conscience [sera] de plus en plus restreint ».

On retrouve ce rétrécissement et cette euphémisation de la pensée dans le domaine des discours portant sur l'innovation. Cependant, alors que la novlangue limite le sens des mots à une seule signification et laisse de côté « toutes les significations subsidiaires », comme le dit le

fonctionnaire imaginé par Orwell, la rhétorique de l'innovation semble aller en sens inverse.

On a ainsi affaire à une réelle innovation langagière que je nommerais l'« innovlangue ». Partant d'un mot qui avait au



**Des textes font même la promotion d'une approche « décoloniale » de l'innovation**



départ un sens bien défini (l'introduction sur le marché d'une invention), on en est venu à étendre le sens du mot « innovation » au point de le vider de tout contenu précis – tout en le faisant suivre de nombreux qualificatifs tout aussi vaseux les uns que les autres, peut-être pour nous faire oublier que le substantif n'a plus de

contenu. Comme si la simple mention du mot « innovation » avait en elle-même une valeur positive et évidente, et qu'il serait pédant de demander de quoi on parle au juste en le prononçant.

Une recherche rapide nous permet de découvrir une panoplie d'expressions employées, sans jamais les définir, dans des documents et discours de porte-parole de l'industrie, d'universités et de gouvernements chargés de promouvoir « l'innovation ». J'ai ainsi répertorié les qualificatifs suivants censés caractériser divers types d'innovation, alors même que ce terme reste indéfini: « équitable », « holistique » ou « totale », « responsable », « ouverte », « durable »; sans compter l'incontournable « innovation citoyenne ». Sans surprise dans l'air du temps actuel, des textes font même la promotion d'une approche « décoloniale » de l'innovation!

L'ensemble de ces « innovations » doit bien sûr former un « écosystème », le préfixe « éco » assurant semble-t-il que ce « système » est d'emblée « écologique ». On parle même de « leaders innovants », ce qui semble un pléonasme, tout comme l'idée que « le changement est une composante *sine qua non* de l'innovation », comme le dit quelque part un « innovateur en chef ».

Mais comment faire pour « innover »? La réponse est simple: « Il faut être créatif et prendre des risques. » Mais surtout, « pour le faire avec succès, il faut s'intéresser aux conditions gagnantes et aux processus qui mènent à ces innovations ».

Toutes ces phrases sont bien sûr vides de contenu et n'osent pas rappeler l'évidence: innover est difficile et le plus souvent imprévisible, sauf pour les modifications marginales qui permettent à des entreprises de faire durer un brevet au-delà de la période légale en invoquant justement une autre « innovation ». Quant aux fameuses innovations dites « radicales » ou, pour les esprits belliqueux, « disruptives », elles ne peuvent être ainsi nommées qu'après coup, tant leurs effets ne se font le plus souvent sentir qu'après des décennies. C'est dire que vouloir les prédire relève de la supercherie. ■



# CONCOURS DE NOUVELLES «Nouvelles Avancées»

SOUS LE PATRONAGE DU MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE ET DE LA JEUNESSE

  
MINISTÈRE  
DE L'ÉDUCATION  
NATIONALE  
ET DE LA JEUNESSE  
*Liberté  
Égalité  
Fraternité*



# LUMIERE!

Jury présidé par Etienne Ghys, secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences (mathématiques)  
et Anne Szymczak, inspectrice générale de l'éducation, du sport et de la recherche

Site : [concours-nouvelles.ensta-paris.fr](http://concours-nouvelles.ensta-paris.fr)

Contact : [concoursdenouvelles@ensta-paris.fr](mailto:concoursdenouvelles@ensta-paris.fr)

Date limite d'envoi : 1<sup>er</sup> mars 2022

Les nouvelles lauréates seront publiées aux Presses de l'ENSTA





# Pour la Science

La science expliquée par ceux qui la font

**COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION  
DÈS MAINTENANT!**



N° 529 (NOV. 21)  
réf. PL529



N° 528 (OCT. 21)  
réf. PL528



N° 527 (Sept. 21)  
réf. PL527



N° 526 (Août 21)  
réf. PL526



N° 525 (Juillet 21)  
réf. PL525



N° 524 (Jun 21)  
réf. PL524



N° 523 (Mai 21)  
réf. PL523



N° 522 (Avril 21)  
réf. PL522



N° 521 (Mars 21)  
réf. PL521



N° 520 (Fév 21)  
réf. PL520



N° 519 (Jan 21)  
réf. PL519



N° 518 (Déc. 20)  
réf. PL518

À retourner accompagné de votre règlement à :

Service Abonnement Groupe Pour la Science – 235 avenue Le Jour se Lève– 92100 Boulogne Billancourt – email : serviceclients@groupepourlascience.fr

**OUI, je commande des numéros de Pour la Science, au tarif unitaire de 9,40 €**

**1 / JE REPORTE CI-DESSOUS LES RÉFÉRENCES** à 5 chiffres correspondant aux numéros commandés :

1<sup>re</sup> réf. \_\_\_\_\_ 01 x 9,40 € = 9,40 €  
 2<sup>e</sup> réf. \_\_\_\_\_ x 9,40 € = \_\_\_\_\_ €  
 3<sup>e</sup> réf. \_\_\_\_\_ x 9,40 € = \_\_\_\_\_ €  
 4<sup>e</sup> réf. \_\_\_\_\_ x 9,40 € = \_\_\_\_\_ €  
 5<sup>e</sup> réf. \_\_\_\_\_ x 9,40 € = \_\_\_\_\_ €  
 6<sup>e</sup> réf. \_\_\_\_\_ x 9,40 € = \_\_\_\_\_ €

**TOTAL À RÉGLER** \_\_\_\_\_ €

**2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES**

M.  Mme

Nom : .....

Prénom : .....

Adresse : .....

Code postal \_\_\_\_\_ Ville : .....

Téléphone \_\_\_\_\_

Courriel : .....

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science  OUI  NON

**3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT**

Par chèque à l'ordre de Pour la Science en nous retournant ce bulletin complété

Groupe Pour la Science – Siège social: 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret: 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

En souscrivant à cette offre, vous acceptez nos conditions générales de vente disponibles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/CGV-PLS>.  
 Offre valable jusqu'au 21/12/2022 en France Métropolitaine uniquement.  
 Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques. Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour La Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse [protection-donnees@pourlascience.fr](mailto:protection-donnees@pourlascience.fr).



Pour retrouver tous nos numéros et effectuer un paiement par carte bancaire, rendez-vous sur [boutique.groupepourlascience.fr](https://boutique.groupepourlascience.fr)



Mardi 22 janvier 2013, sur les lieux de la fuite de l'usine Lubrizol, à Rouen.

## Gestion de crise

### Le nécessaire partage d'un récit



#### CONTEXTE

Accident nucléaire, explosion, fuite de produit chimique ou incendie sur un site industriel : comment, en situation de crise par nature incertaine et potentiellement dangereuse, prendre les meilleures décisions possibles ? Classiquement, l'expertise et ses projections prédictives guident ces choix.

Pour autant, ce n'est pas forcément un processus linéaire. L'expertise peut réorienter le processus décisionnel, qui à son tour peut modifier le cadrage de l'expertise. C'est toute cette construction itérative qu'analyse le projet Edge mené par l'IRSN en collaboration avec l'Ineris.

Cahier partenaire  
réalisé avec

**IRSN**

[www.irsn.fr](http://www.irsn.fr)

**En janvier 2013, une fuite de gaz à l'usine chimique Lubrizol à Rouen provoque une crise de plusieurs jours. L'étude sociologique de cet événement souligne que lors de la gestion d'une telle crise, il est essentiel que l'ensemble des acteurs impliqués s'accordent sur un même récit prédictif de l'accident. Elle montre que l'élaboration de ce récit passe par des moments clés, qui jouent sur l'émergence de la solution à mettre en œuvre pour protéger la population.**

**L**e lundi 21 janvier 2013, une fuite accidentelle de gaz à l'usine Lubrizol de Rouen déclenche une situation de crise. Le gaz, du Mercaptan, est sans grave danger pour la santé mais il provoque d'importants désagréments (nausées, maux de tête) et a la même odeur que le gaz de ville. Très vite les standards téléphoniques des pompiers et du Samu sont saturés par les appels des populations environnantes croyant à une fuite chez elles ; d'autant plus que l'odeur se répand ensuite jusque dans la région parisienne et dans le sud de l'Angleterre (voir encadré).

Pendant trois jours, services d'urgence, pouvoirs publics et experts locaux (préfecture, SDIS\*, Dreal\*) mais aussi pouvoirs publics nationaux (ministères de l'Intérieur, de l'Écologie, de la Santé) et experts (Ineris et sa cellule de crise, la Casu), sont mobilisés pour, d'une part, préciser la nature de la fuite (quels gaz exactement, quelles quantités, quels dangers éventuels...) et, d'autre part, définir un moyen d'arrêter la réaction chimique à l'origine de la fuite ainsi qu'une stratégie pour gérer les aspects « sécurité civile » (annulation de manifestations, évacuation de population, gestion du risque de panique et de la saturation des standards...). La ministre de l'Écologie de l'époque, Delphine Batho, en déplacement à Berlin le 22 janvier, se rend elle-même sur le site dans la soirée pour répondre aux nombreuses questions. ➤

➤ Cet accident industriel revêt des caractéristiques qui en font un cas d'école aux yeux d'Elsa Gisquet, sociologue au laboratoire de Sciences humaines et sociales de l'IRSN. « *C'est un événement récent, local, qui devient national et qui implique des acteurs très divers qui doivent ensemble gérer la crise* », explique la chercheuse. L'objectif est de comprendre comment, face à un événement imprévu potentiellement à risque, s'organise la coopération entre les différents acteurs locaux et nationaux, de même que la façon dont ceux-ci mobilisent les connaissances techniques pour faire émerger une solution à même de protéger la santé des populations et l'environnement.

## FACTEURS HUMAINS ET ORGANISATIONNELS

Ce sujet, la manière dont les acteurs s'emparent de l'expertise en situation de crise, a en effet été peu étudié. Or il est crucial pour l'IRSN de tenir compte de l'ensemble des facteurs qui contribuent à la sûreté des installations nucléaires, dont les aspects humains, organisationnels et sociaux. Un projet de recherche sur ces questions, mené par l'IRSN en partenariat avec l'Ineris, a donc vu le jour au cours de l'année 2016, le projet Edge – Interfaces entre expertise et décision en situation de gestion de crise dans les industries à hauts risques –, qui s'appuie notamment sur l'analyse de l'accident de fuite de gaz à Lubrizol en 2013.

Elsa Gisquet, en charge du projet Edge, a développé une approche qui s'intéresse à l'évolution des expertises plutôt qu'à leurs seuls résultats. Autrement dit, elle étudie la manière dont s'élabore un récit prédictif de l'accident partagé par les divers acteurs. En effet, ce récit n'est pas le résultat d'actions prédéterminées par des règles, mais le produit d'un processus complexe inscrit dans la durée, intégrant de nombreux acteurs qui articulent plus ou moins bien leurs actions individuelles et qui peuvent avoir des conceptions différentes de la situation dans laquelle ils sont engagés. Cette construction intègre non seulement les évolutions liées à l'événement lui-même – par exemple, ici, les conditions atmosphériques qui déterminent la diffusion des rejets gazeux –, mais aussi l'ensemble des ajustements de travail réalisés pour une coordination adaptée des acteurs.

Quels sont alors les éléments qui déclenchent et motivent les configurations et reconfigurations de ces trajectoires de la science en action ?

La méthodologie adoptée pour répondre à cette question a été de reconstituer la chronologie de l'accident sous forme de récit à partir d'une quinzaine d'entretiens approfondis avec les principaux acteurs impliqués dans la gestion de la crise. Cette reconstitution s'appuie également sur deux types de sources documentaires, les sources primaires élaborées par les protagonistes (communiqués de presse, notes internes) et les sources secondaires (commentaires, rapports officiels, articles de presse).

Le récit obtenu permet de distinguer quatre phases clés et d'en analyser les ressorts. « *Nous avons ainsi identifié les moments d'articulation entre les acteurs, c'est-à-dire les moments de consensus quant aux actions à entreprendre, qui impliquent également un partage de la perception de la crise. Et les moments de désarticulation, de désaccord, qui sont à l'inverse des sources potentielles de tension et de méfiance* », précise Elsa Gisquet.

La première est une phase d'articulation. Les préludes de l'événement commencent une veille de week-end, lorsqu'un opérateur tentant de redémarrer une pompe actionne par erreur un agitateur dans une cuve remplie de produit chimique. Pendant le week-end, l'agitateur fait monter en température la cuve et provoque la dégradation de son contenu. Au retour du week-end, le lundi – J1, premier jour de crise –, les opérateurs, surpris par l'odeur, constatent l'instabilité du produit. Le plan de secours interne est déclenché par l'industriel.

## PREMIÈRE PRÉDICTION RASSURANTE

Les acteurs habituellement mobilisés pour faire face à ce type d'incident (SDIS, Dreal, Casu) se rendent alors sur place. Dans cette première phase, chacun dans sa sphère professionnelle développe son expertise à partir de ses outils habituels. L'ensemble livre un « récit prédictif » de l'événement relativement rassurant : aucune trace de sulfure d'hydrogène, très toxique, n'est détectée. Le nuage est essentiellement composé de Mercaptan, plus connu pour son odeur désagréable que pour sa toxicité. Ce qui incite à classer le problème dans la catégorie des « nuisances olfactives » et non des « risques sanitaires », d'autant que, dans cette région fortement industrialisée, la population locale n'en est pas à sa première fuite et se trouve donc face à une circonstance « familière ».

Puis, deuxième phase, de désarticulation cette fois : la crise bascule dans un tempo de l'urgence pour tous. Dans la nuit, le vent a tourné plusieurs fois. L'odeur est arrivée aux portes de

## LE VENT DE LA CRISE

Après le temps de l'alerte dans la matinée du 21 janvier 2013, où l'exploitant de l'usine reçoit les premières plaintes, il déclenche son plan interne et informe les communes voisines, la préfecture et la direction régionale.

Dans l'après-midi, l'odeur du gaz se répand dans et aux alentours de Rouen, et l'information commence à circuler sur les réseaux sociaux.

Le soir, la préfecture en est à son troisième communiqué et les standards des services d'urgence sont saturés. Dans la nuit, le vent tourne à plusieurs reprises. L'odeur de Mercaptan a d'abord atteint la région parisienne.

Le mardi 22 janvier, à 5 heures, le ministère de l'Intérieur diffuse son premier communiqué. Les services de secours parisiens reçoivent plus de 10 000 appels dans la matinée.

Les ministères de l'Intérieur, de l'Écologie et de la Santé activent leur cellule de crise. La crise est devenue nationale. Dans l'après-midi, l'odeur gagne le sud de l'Angleterre. À 19 heures, la ministre de l'Écologie arrive sur le site.

Les modélisations du panache odorant, ci-contre, en rouge, réalisées par l'Ineris, montrent l'évolution du nuage dans le temps. (Crédit Ineris)





Paris. Au petit matin du mardi, J2, l'ambiance sur le site est tout autre : les caméras de BFM-TV sont sur place. Le ministère de l'Intérieur s'est mobilisé et a déjà organisé une audio-conférence dans la nuit, questionnant les expertises proposées la veille : de quelle famille de Mercaptan s'agit-il ? Est-on vraiment sûr que du sulfure d'hydrogène ne risque pas d'être relâché ? Il demande alors à la Casu de nouvelles projections sur le danger de la substance, le périmètre concerné, l'évacuation potentielle de la population.

### SCÉNARIO LE PLUS PESSIMISTE

Ce basculement est certes dû à l'évolution même de l'événement mais aussi à la façon dont cette évolution désorganise le travail des experts et remet en question l'ensemble des données sur lesquelles ils s'étaient entendus pour se représenter l'événement en cours. Il faut vite produire de nouvelles prédictions, dans l'urgence. Résultat, en fin de matinée de ce J2, la Casu propose une modélisation très majorante, c'est-à-dire qui considère le scénario le plus pessimiste : tout le soufre contenu dans la cuve serait intégralement et instantanément relâché sous forme de sulfure d'hydrogène. Ces résultats présentés en audio-conférence à 14 heures sont contestés par l'exploitant : surestimés et loin de la réalité, selon lui. La préfecture demande alors à l'ensemble des experts de s'accorder sur leurs hypothèses et sur un récit prédictif de l'accident, cohérent.

S'ouvre alors en fin de journée (de ce J2) une troisième phase, d'articulation : un moment d'échanges et de discussions entre tous les experts, qui sortent de leurs schémas organisationnels habituels. Par exemple, l'exploitant et la Casu échangent directement, sans cette fois-ci passer par l'intermédiaire d'un tiers (Dreal). Là, le temps de l'urgence est suspendu, ils prennent le temps de confronter les données de terrain et les hypothèses retenues pour les calculs (la Casu, la Dreal, mais aussi l'industriel). La hauteur du point de rejet passe de 13 à 16 mètres, on ne considère plus un rejet instantané, il est désormais calculé pour trois durées différentes (1 minute, 2 minutes et 5 minutes), etc. Ces dernières hypothèses conduisent à un récit prédictif de nouveau rassurant qui fait consensus chez les experts et qui s'étend aux décideurs. La zone dangereuse étant circonscrite au sein de l'usine, l'évacuation de la population est clairement exclue.

Cependant, cette solution qui clôt définitivement la question de l'évacuation ne règle pas tous les problèmes : tant que l'importante quantité de produit à l'origine de la fuite n'est pas traitée, les émanations gazeuses risquent de repartir. Que faut-il faire pour l'ensemble du territoire concerné, qu'attend-on, qu'espère-t-on ? C'est un quatrième moment clé. La réponse va venir d'un consensus des autorités préfectorale et ministérielle et s'est traduit par : « *Je veux zéro odeur dans la zone, je ne veux plus que ça sente!* ». À partir de-là, l'objectif clair étant de se prémunir des émanations de gaz odorant, l'expertise propose un changement de temporalité : plutôt que de traiter le problème de manière rapide, on donne la priorité à la définition d'un protocole dont la mise en œuvre prend du temps car il sera appliqué de nuit et par petite quantité à traiter à chaque fois, de manière à ne pas prendre le risque de gêner la population et ainsi de perturber l'ordre social à nouveau. L'exploitant devra gérer pendant plusieurs semaines sa cuve de produit dégradé, potentiellement très dangereux pour les opérateurs sur le site. Cependant, ce changement de temporalité permet d'entrevoir la sortie de crise.

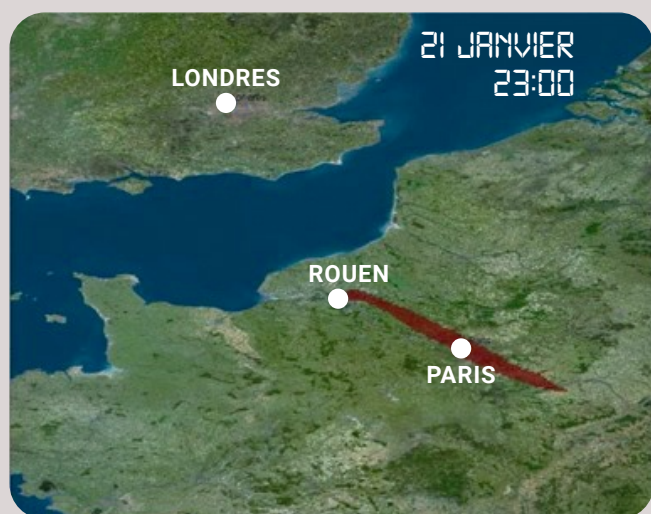
Un premier enseignement à tirer de ces résultats est l'intérêt d'utiliser ces différentes phases de l'expertise pour élargir l'éventail des solutions. Et sortir ainsi des scénarios binaires – du type évacuation contre non-évacuation – voire des clivages professionnels ou institutionnels. Il s'agit là pour l'IRSN d'une piste de réflexion intéressante qui pourrait enrichir les possibilités de concertation entre tous les acteurs concernés. L'analyse de la gestion de cette crise montre en effet que l'action conjointe des acteurs est primordiale pour faire émerger une solution bien ancrée dans le réel et en phase avec les attentes du territoire. ■

\*SDIS: service départemental d'incendie et de secours

\*Dreal: Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

### RÉFÉRENCES

> Expertise, décision et gestion de crise – Aux interfaces entre incertitudes et action, Rapport IRSN/2019-00685

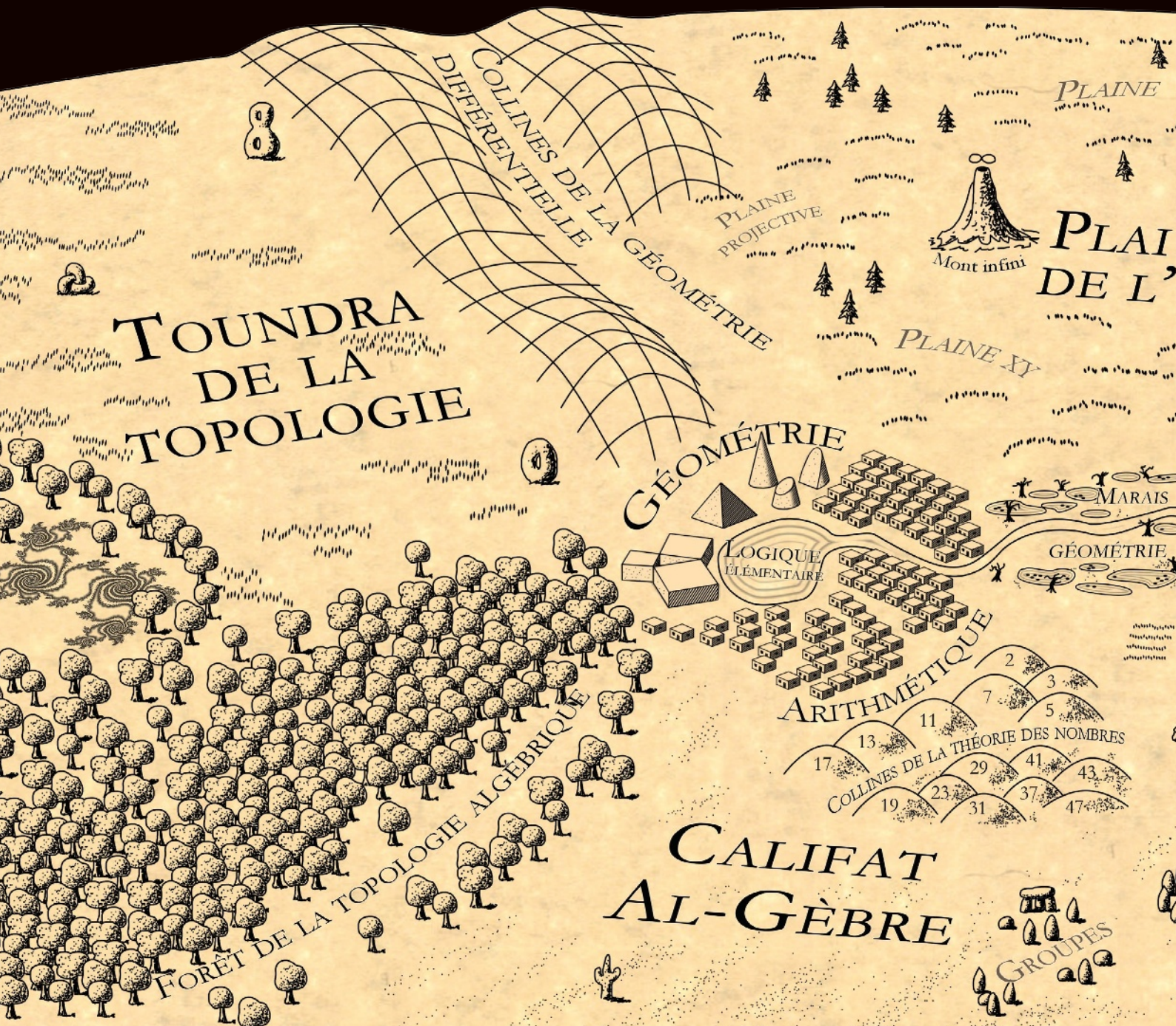




# Théorie des catégories Les maths à vol d'oiseau

Manon Bischoff

Née il y a environ quatre-vingts ans, la théorie des catégories a permis d'identifier des liens entre des objets mathématiques de natures différentes, d'où de grandes avancées. Depuis peu, elle s'ouvre à d'autres disciplines : la physique, l'informatique... et même la linguistique.





# LUNE DE LA THÉORIE DES CATÉGORIES



© Martin Kuppe pour Spektrum der Wissenschaft

Comme dans un rêve, imaginez que vous volez au-dessus d'un monde imaginaire nommé Mathématistan. De ce point de vue privilégié, vous reconnaissez, à sa place relativement centrale, le royaume de l'arithmétique, où les nombres sont additionnés entre eux, multipliés, soustraits ou divisés. Juste à côté, vous distinguez les collines de la théorie des nombres, où habitent les nombres premiers et d'autres constructions étranges. Au sud s'étend le vaste califat de l'algèbre, où l'on manipule les nombres mais aussi d'autres objets plus compliqués, les matrices par exemple.

À cette altitude, les détails de chaque région sont un peu flous. Mais vous voyez les structures globales, les ponts et les domaines frontaliers qui connectent les différentes contrées. Par exemple, entre la toundra de la topologie et le califat de l'algèbre se dresse la forêt de la topologie algébrique. Dans ce coin du monde, les concepts des deux régions se rejoignent et s'unissent. Alors que les habitants de la toundra classent les objets géométriques en fonction, par exemple, du nombre de leurs trous, les topologues algébristes calculent ce nombre en utilisant des constructions algébriques telles que des fonctions ou des groupes.

De nombreux chercheurs rêvent d'accéder à cette vision globale du monde des mathématiques. Il y a encore quelques siècles, certains grands esprits universalistes étaient versés dans pratiquement tous les pans du savoir, qu'il s'agisse de philosophie, de physique ou de médecine. Leurs connaissances dans un domaine enrichissaient leurs réflexions dans les autres. C'est devenu impossible: un spécialiste de la théorie des nombres et un statisticien ont aujourd'hui du mal à se comprendre, et pourtant ils sont tous les deux mathématiciens!

Chaque domaine des mathématiques a développé ses outils, ses objets, son vocabulaire... Malgré cette tendance à la spécialisation et à la différenciation, les chercheurs dénichent parfois des similarités entre des structures appartenant à des domaines distincts. Grâce à ces découvertes et ces passerelles, ils peuvent par exemple transposer un problème d'analyse (domaine qui s'intéresse en particulier aux fonctions régulières) dans le langage de la théorie des nombres et exploiter les outils associés. Pour trouver ces ponts entre les différents domaines, il faut accepter de prendre de la hauteur et ne pas se perdre dans des détails spécifiques d'une sous-discipline. Cette démarche est exactement celle qui est mise en œuvre par la théorie des catégories.

«J'ai toujours été séduite par les moments de grâce qui surviennent quand on trouve le lien qui unit deux idées *a priori* très différentes», raconte la mathématicienne Tai-Danae Bradley,

L'ESSENTIEL

- > La théorie des catégories offre une vision globale de différents domaines mathématiques. Elle y met ainsi en évidence des similitudes et des connexions jusque-là inconnues.
- > Ce changement de point de vue a cependant l'inconvénient de gommer les détails de chaque domaine. Cette

approche ne fournit donc pas des résultats explicites, mais livre parfois des indices pour résoudre certains grands problèmes mathématiques.

- > Des chercheurs d'autres disciplines se tournent vers cette théorie abstraite pour obtenir un nouvel éclairage sur leurs problèmes.

de l'université de la ville de New York. J'étais donc très enthousiaste quand j'ai entendu parler pour la première fois d'une branche des mathématiques qui aide à formuler clairement cette approche globale.»

Ce changement de point de vue a aussi ses inconvénients. Les spécialistes de la théorie des catégories planent si haut qu'ils ne fournissent que rarement des résultats explicites: ils ne résoudreont jamais une équation différentielle ni ne calculeront une intégrale. D'un autre côté, ils pourraient découvrir des chemins inconnus qui mèneront à la solution d'un problème bien concret. Mais pour implémenter cette solution, il faut à un moment revenir sur terre et effectuer le travail dans le domaine approprié.

UNE TRÈS GRANDE GÉNÉRALITÉ

À ses débuts, la théorie des catégories a été accueillie avec scepticisme. Les mathématiciens s'y réfèrent souvent, avec une certaine dose d'humour, à du «non-sens abstrait». Néanmoins, le fait que cette branche des mathématiques soit parfois très utile est aujourd'hui incontestable. De nombreuses avancées de ces dernières décennies auraient été impossibles sans son aide. Par ailleurs, si elle est considérée comme l'une des branches les plus abstraites des mathématiques, la théorie des catégories apparaît de plus en plus dans d'autres domaines de la science, par exemple en informatique et en linguistique, afin d'aborder leurs problèmes spécifiques sous un nouvel éclairage.

Si cette théorie s'adapte si bien à une grande diversité de disciplines, c'est parce que les catégories sont définies en des termes très généraux. Une catégorie consiste en une collection d'objets qui peuvent être transformés les uns dans les autres grâce à ce qu'on nomme des «morphismes» (voir la figure ci-contre). Un exemple de catégorie est celle où les objets sont les entiers naturels (0, 1, 2, ...) et les morphismes les fonctions  $f$  qui, à un entier  $n$ , associent un entier  $m$ . Un autre exemple est la catégorie où les objets sont les surfaces, les morphismes étant les transformations qui déforment une surface en une autre. Plus généralement, on peut voir une catégorie comme une collection de flèches

L'AUTRICE



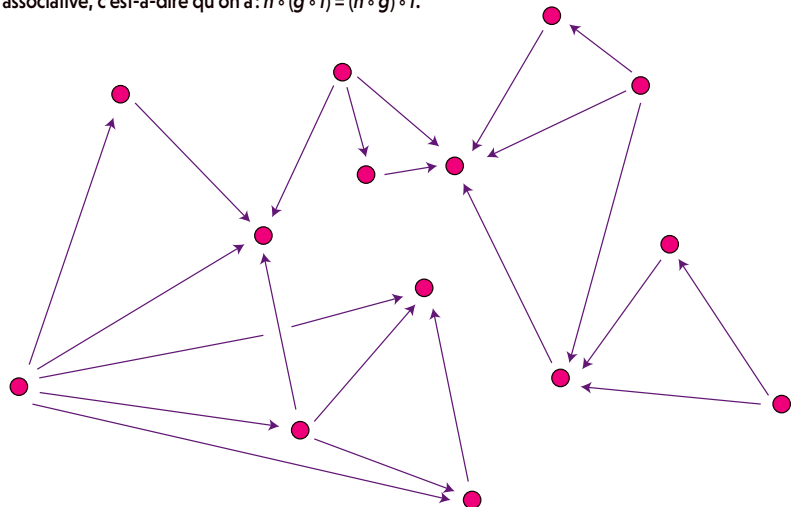
**MANON BISCHOFF**  
physicienne théoricienne de formation et rédactrice à *Spektrum der Wissenschaft*

(morphismes) reliant différents points (objets). Peu importent les entités exactes désignées par les flèches et les objets: ce qui compte, c'est la façon dont elles sont connectées.

Il y a environ soixante-dix ans, cette approche a conduit à un changement drastique de paradigme. Dans le cadre de la théorie des ensembles, sur laquelle repose la quasi-totalité des mathématiques, les objets de chaque domaine sont définis avec précision. En théorie des catégories, à l'inverse, les entiers naturels et les formes géométriques peuvent se confondre, alors que la catégorie des nombres reliés par des fonctions continues est radicalement différente de la catégorie des nombres reliés par des fonctions dérivables. Ici, un objet est complètement défini par ses relations aux autres objets de sa catégorie – qu'il s'agisse d'un nombre, d'une surface ou d'un objet plus abstrait. Cela peut surprendre, mais l'idée n'est pas nouvelle: en physique, par exemple, on identifie une particule dans un collisionneur en la bombardant avec d'autres particules et en étudiant leurs interactions.

DES FLÈCHES ET DES POINTS

Une catégorie consiste en une collection d'objets  $A, B, C, \dots$  (points rouges) et de transformations  $f, g, h, \dots$  (flèches violettes), nommées «morphismes». Chaque morphisme  $f$  relie exactement deux objets ( $f: A \rightarrow B$ ). En outre, pour chaque objet, il doit exister un morphisme ( $1_A: A \rightarrow A$ ) nommé «identité de  $A$ ». Étant donnés deux morphismes  $f: A \rightarrow B$  et  $g: B \rightarrow C$ , il existe une loi de composition telle que  $g \circ f: A \rightarrow C$ , comme si l'on exécutait les deux morphismes l'un après l'autre. Cette loi est associative, c'est-à-dire qu'on a:  $h \circ (g \circ f) = (h \circ g) \circ f$ .





La théorie des catégories fournit aux mathématiciens un cadre conceptuel qu'ils peuvent remplir avec des objets et des applications de leur domaine propre. En procédant ainsi, ils n'ont pas besoin de se focaliser sur les détails de chaque élément de leur domaine, il leur suffit de se concentrer sur les structures sous-jacentes.

Il est même possible d'aller plus loin et c'est là que la théorie des catégories prend toute son envergure. Comme la nature des objets que l'on met dans une catégorie n'a pas d'importance, il est possible de la remplir avec des catégories. On obtient des catégories d'ordre supérieur, ce qui permet de découvrir des ponts entre les différents domaines des mathématiques. Ces ponts correspondent précisément aux transformations nommées «foncteurs», qui font passer d'une catégorie à une autre (voir la figure page 34).

## DESCARTES : UN FONCTEUR AVANT L'HEURE

Les foncteurs sont ainsi une généralisation des morphismes. L'un des exemples les plus célèbres de foncteur a été découvert par René Descartes au XVII<sup>e</sup> siècle, bien avant le développement de la théorie des catégories. Le mathématicien français avait constaté que de nombreux problèmes de géométrie de son époque pouvaient être résolus par des équations algébriques. Il a alors introduit le système de coordonnées cartésiennes, qui a permis de connecter directement la géométrie et l'algèbre (voir l'encadré ci-contre).

La naissance de la théorie abstraite formalisant cette vision arrivera bien plus tard. En 1941, le mathématicien américain Saunders Mac Lane donna une série de six conférences à l'université du Michigan sur ses travaux les plus récents en théorie des nombres. N'ayant pu assister à la dernière séance, son collègue Samuel Eilenberg recontacta Mac Lane un peu plus tard. Ce dernier lui répéta le contenu de son séminaire. Eilenberg n'en croyait pas ses yeux : Mac Lane avait construit un objet mathématique qu'il avait déjà vu dans un tout autre contexte, en topologie.

Cette coïncidence était vraiment surprenante, car la topologie et la théorie des nombres avaient, à cette époque, peu de choses en commun. La topologie s'apparente à de la géométrie où l'on aurait oublié comment mesurer des distances et gardé seulement une notion de proximité des points. Elle décrit les formes, mais sans les détails métriques. Pour un topologue, deux objets obtenus l'un à partir de l'autre par une déformation continue, c'est-à-dire sans déchirement ni recollement, sont équivalents. De son côté, la théorie des nombres s'intéresse aux systèmes de nombres. Néanmoins, chacun de ces deux domaines est étroitement connecté à l'algèbre.

Les mathématiciens ont mis beaucoup de temps à comprendre que les concepts de topologie pouvaient eux aussi être reformulés dans un langage algébrique. Au début du XX<sup>e</sup> siècle, la topologie algébrique faisait ses premiers pas. L'obstacle principal venait de la nature «imprécise» de la topologie. Par exemple, l'équation  $x^2 + y^2 = 1$  correspond à un cercle ; or une ellipse, qui est topologiquement équivalente au cercle (il suffit de l'étirer pour obtenir cette nouvelle forme), est décrite par une équation différente.

Comme de telles équations ne semblaient pas être la bonne piste pour parler de topologie, les mathématiciens se sont tournés vers d'autres objets algébriques : les entiers. En utilisant ce qu'on nomme des invariants topologiques, les chercheurs classent les objets et déterminent s'ils sont similaires. Par exemple, on peut compter le nombre de trous que

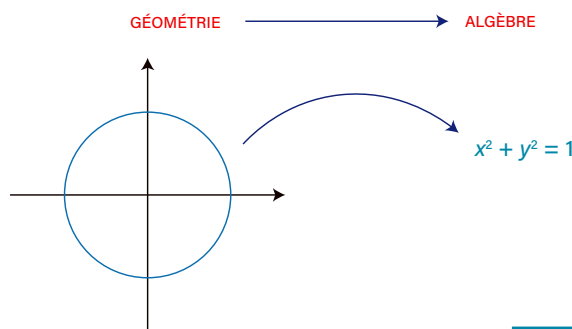
## GÉOMÉTRIE ET ALGÈBRE

Trois siècles avant la naissance de la théorie des catégories, René Descartes a mis au jour une connexion entre géométrie et algèbre. Alors que la géométrie s'occupe des collections de points dans l'espace, l'algèbre s'intéresse aux liens entre objets abstraits. Si, par exemple, vous cherchez les points d'intersection de deux courbes, vous pouvez soit les dessiner et lire le résultat dans le système de coordonnées, soit calculer les coordonnées qui satisfont aux deux équations des courbes. Les figures géométriques sont métamorphosées en équations.

Dans les années 1970, Alexandre Grothendieck a établi la preuve formelle que les deux domaines sont vraiment équivalents. À cette époque, du côté de l'algèbre, il travaillait sur la catégorie des anneaux commutatifs (des collections d'objets qui peuvent être additionnés ou multipliés, de la même façon que les nombres entiers, et où l'opération d'addition ou de multiplication ne dépend pas de l'ordre dans lequel les deux objets sont pris). L'ensemble des polynômes de la forme  $a_n x^n + \dots + a_1 x + a_0$  constitue un exemple d'anneau commutatif. La catégorie de ces anneaux contient des applications  $f$ , qui transforment un anneau  $R$  en un autre anneau  $S$  ( $f : R \rightarrow S$ ), c'est-à-dire qui transforme par exemple les polynômes en nombres réels, qui forment un autre anneau commutatif.

En géométrie, Grothendieck a aussi lancé une refondation du domaine en généralisant le type des objets considérés. Il a ainsi étudié la catégorie des « schémas affines », qui contient tous les espaces topologiques associés à des anneaux commutatifs.

Grâce à sa démarche de généralisation, avec d'un côté la catégorie des anneaux commutatifs et de l'autre la catégorie des schémas affines, Grothendieck a montré qu'il existe une correspondance univoque entre l'algèbre et la géométrie : pour chaque anneau commutatif, il existe exactement un schéma affine, et inversement (et en particulier, pour chaque polynôme, il existe une seule courbe algébrique). Du point de vue de la théorie des catégories, les deux catégories sont donc équivalentes. Ce pont permet de « traduire » un théorème d'un domaine et de l'exprimer (et de l'utiliser) dans l'autre domaine.



comporte une surface. Ainsi, une baguette (zéro trou) et un bretzel (trois trous) diffèrent fondamentalement d'un point de vue topologique, alors qu'une tasse et un beignet de type *donut* sont similaires (un seul trou).

Même un enfant peut comprendre cette simple classification. Mais celle-ci peut être difficile à mettre en place de façon formelle. En deux dimensions, il est souvent possible de visualiser une forme pour en déduire le nombre de trous et son invariant topologique. Mais quand le nombre de dimensions augmente, le problème devient bien plus épineux.

Les mathématiciens ont donc cherché des méthodes algébriques pour détecter les trous. En 1895, Henri Poincaré a été l'un des premiers à comprendre qu'une façon de faire consiste à étudier toutes les courbes fermées que peut contenir la surface considérée. Si toutes ces courbes peuvent être contractées en un point comme un lasso sans quitter la surface, alors ce dernier est dénué de trou. C'est le cas d'une sphère (creuse). Sur un tore ou un *donut*, on distingue deux types de courbes qui ne peuvent pas se contracter en un point (voir la figure page 35).

## DES OBJETS ALGÈBRIQUES POUR LES ESPACES TOPOLOGIQUES

Cependant, les objets de la topologie, les «espaces topologiques», ne sont pas toujours aussi simples qu'une sphère ou un tore. Ils peuvent être des objets disjoints dans un espace à grand nombre de dimensions, ou être composés d'éléments issus d'étranges systèmes de nombres. Ils sont alors plus difficiles à classer.

Dans les années 1920, la mathématicienne allemande Emmy Noether a remarqué qu'aux espaces topologiques on peut associer non seulement des entiers, mais aussi d'autres entités algébriques, les groupes. Parmi les versions les plus simples de ces derniers figurent les rotations ou les réflexions d'une figure géométrique. De façon générale, la définition d'un groupe est similaire à celle d'une catégorie : un groupe est un ensemble d'objets qui se combinent les uns avec les autres et qui présente un élément «neutre» (comme l'est le 1 dans la multiplication usuelle entre nombres). Mais un groupe doit satisfaire à une autre exigence : pour chaque élément du groupe, il existe un «inverse», de sorte que la combinaison de l'élément avec son inverse donne l'élément neutre.

Comme Noether l'a découvert, il existe un certain type de groupes, les «groupes d'homologie», dont les nombres caractéristiques, que l'on peut calculer, correspondent aux invariants des espaces topologiques. Si l'on déforme un espace sans changer les invariants associés, il existe des transformations similaires sur les groupes d'homologie, qui conservent également leurs nombres caractéristiques. Dès lors, s'il est

difficile de calculer les invariants d'un espace topologique, il peut être plus simple de travailler sur les groupes d'homologie associés.

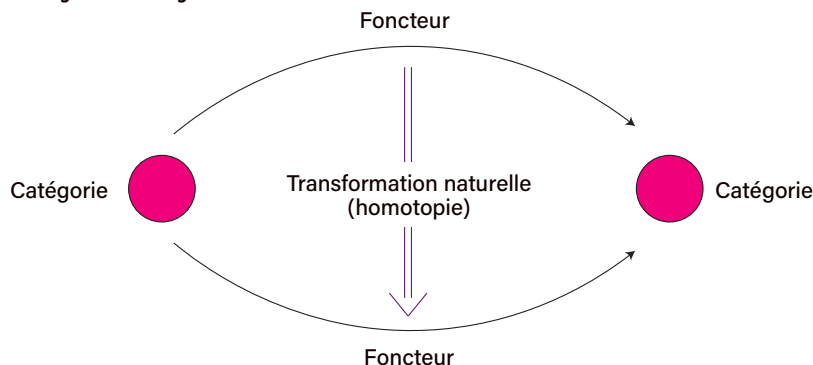
Grâce à ce résultat, Noether a inauguré une nouvelle ère de la topologie algébrique. Étaient propulsés sur le devant de la scène non seulement les espaces topologiques, mais aussi leurs relations lorsqu'ils sont déformés de l'un vers l'autre. Pour chaque transformation qui modifie un espace sans y créer de nouveaux trous, il existe une application reliant les groupes d'homologie associés (voir l'encadré page 37). Ainsi, l'objectif principal de la théorie des catégories, qui consiste à mettre l'accent sur les relations entre les objets, commençait déjà à émerger et n'attendait qu'à être formalisé.

Avant son voyage à l'université du Michigan, Eilenberg travaillait sur des groupes d'homologie d'espaces compliqués. Mac Lane, de son côté, travaillait sur des groupes qui apparaissent en théorie des nombres. En effet, quand on relie certains nombres par des relations, une structure de groupe y est souvent associée. Par exemple, les nombres entiers munis de la loi d'addition forment un groupe. Dans les régions les plus abstraites de la théorie des nombres, il est souvent plus efficace et utile d'étudier les groupes associés que les nombres eux-mêmes.

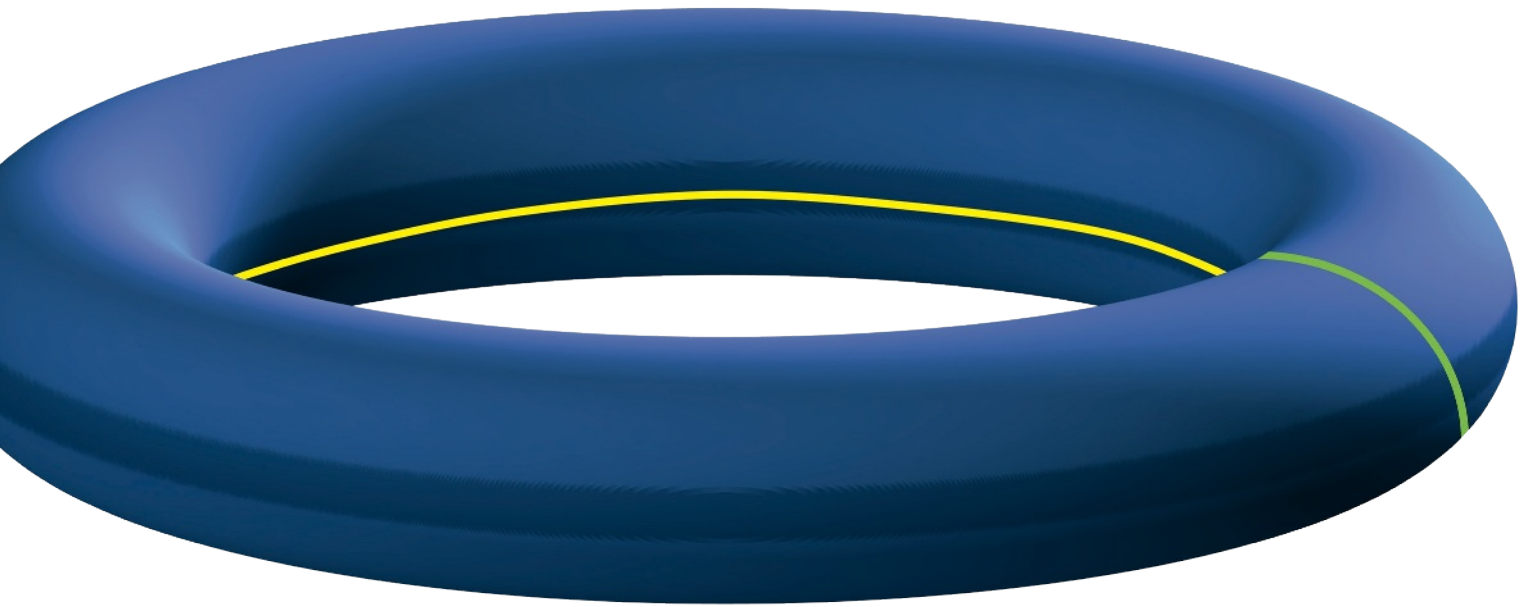
À l'époque de ses séminaires, Mac Lane s'intéressait aux corps (une sorte de généralisation des nombres). Pour simplifier certains de ses calculs, il avait reformulé son problème grâce à l'algèbre. Pour y parvenir, il avait construit un type de groupe spécial, en utilisant une extension de groupes. En termes simples, une telle opération consiste à partir d'un groupe  $G$  et à le faire croître à l'aide d'un autre groupe  $H$ , de telle façon que le résultat soit encore un groupe.

Alors que Mac Lane lui présentait ses travaux, Eilenberg a aussitôt reconnu l'extension de groupe. Il l'avait déjà croisée dans les travaux de son collègue Norman Steenrod, qui l'avait utilisée pour étudier un certain espace topologique. Cet espace était obtenu en prenant un premier tore et un second enroulé un nombre  $p$  de fois à l'intérieur du premier. Le

Un foncteur relie une catégorie à une autre et des transformations naturelles permettent de passer d'un foncteur à un autre. Les mathématiciens ont généralisé cette idée en définissant des catégories de catégories.







groupe d'homologie associé correspondait au groupe étudié par Mac Lane. «Nous sommes restés réveillés toute la nuit pour essayer de comprendre d'où venait ce lien», a raconté Mac Lane. Cet épisode a marqué le début d'une collaboration riche et une amitié durable entre les deux chercheurs.

En plus du lien surprenant, les deux mathématiciens étaient fascinés par le fait que les calculs de Mac Lane étaient beaucoup plus simples que ceux associés aux espaces topologiques. En effet, il est souvent très difficile de faire des calculs avec les groupes d'homologie. En outre, après plusieurs mois d'un travail acharné, les chercheurs ont découvert que les extensions de groupes forment une sorte de pont entre différentes méthodes algébriques pour déterminer les propriétés topologiques d'un espace. Ainsi, quand une approche ne fonctionnait pas, les extensions de groupes pouvaient indiquer une autre piste pour étudier un espace topologique.

Durant les quelques années qui ont suivi, les deux chercheurs ont mis au jour d'autres correspondances entre l'algèbre et la topologie. «Il y en avait plus que nous ne l'anticipions, a noté Mac Lane. Nous étions obligés d'inventer des catégories pour les décrire.» À l'époque, ils ne définissaient pas encore des catégories à l'image des objets abstraits que l'on considère aujourd'hui, mais se limitaient au cas particulier d'une catégorie composée de groupes. Les catégories étaient pour eux un simple outil.

Dans un premier temps, les mathématiciens n'ont pas manifesté beaucoup d'intérêt pour ces catégories. Alexandre Grothendieck fut le premier à prendre la pleine mesure de l'utilité de ce concept abstrait. Il a été l'un des chercheurs les plus influents dans son domaine

au xx<sup>e</sup> siècle (au moins jusqu'à sa retraite dans les montagnes de l'Ariège, où il s'est complètement coupé du monde extérieur).

Au début de sa carrière, Grothendieck travaillait sur des problèmes d'analyse (la branche des mathématiques qui s'intéresse au calcul infinitésimal et à son application dans de nombreux contextes). Au début des années 1950, il ne trouvait pas de poste en France car il refusait de prendre la nationalité française pour ne pas avoir à faire le service militaire. Apatride, il partit au Brésil puis aux États-Unis (avant de revenir en France en 1956), et son attention se porta sur d'autres branches des mathématiques.

## UN APPORT DÉCISIF D'ALEXANDRE GROTHENDIECK

Lors d'un séjour à l'université du Kansas, Grothendieck se pencha sur la topologie algébrique. À cette époque, ce domaine était assez chaotique. Encore aujourd'hui, les chercheurs tentent de trouver une recette générique qui fournit le groupe d'homologie correspondant à un espace topologique. À défaut, ils ont développé diverses méthodes, nommées «théories d'homologies», qui diffèrent les unes des autres selon le type d'espace considéré. Grothendieck a établi une base commune pour de nombreuses théories d'homologies et en a aussi découvert de nouvelles.

Ces résultats ont été motivés par l'intérêt que portait Grothendieck à la notion de «faisceaux», des objets introduits par le mathématicien français Jean Leray en 1946 et qui apparaissent quand on étudie les structures algébriques sur un espace topologique compliqué. De façon formelle, les espaces topologiques sont définis comme une union d'ensembles (on «colle» des domaines individuels les uns aux

Contrairement à la sphère, il existe sur la surface d'un tore des courbes fermées qu'il est impossible de déformer continûment, sans quitter la surface, pour les contracter en un point (courbes jaune et verte, par exemple). Par cette approche, il est possible de déterminer le nombre de trous d'un objet topologique.

autres). Quand on considère un objet algébrique comme une fonction sur un espace, on a besoin de savoir comment il se comporte aux points de contact entre les domaines collés. C'est à cette étape que la théorie des faisceaux apporte une aide précieuse.

Les faisceaux jouent aussi un rôle en physique, par exemple en théorie de la relativité générale, qui décrit la déformation de l'espace-temps due à la présence de masses ou d'énergie. Le mouvement de la matière dans un tel espace-temps est alors obtenu en résolvant les équations du mouvement dans un espace courbe. Les physiciens utilisent une astuce qui revient à ne considérer qu'une petite portion de l'espace, qui apparaît alors plate (de la même façon que la Terre nous semble plate autour de nous), puis à résoudre les équations en chaque point de l'espace-temps dans le cas d'un univers plat et, ensuite, à assembler les différentes solutions.

Cependant, la théorie des faisceaux fonctionne en général localement: elle permet



## La théorie des catégories considère comme identiques deux objets s'ils sont isomorphes

d'étudier ce qui se passe au voisinage d'un point dans l'espace, mais sans considérer la structure globale. Par exemple, il n'y a pas de différence lorsqu'on colle ensemble des fonctions sur une surface cylindrique ou un ruban de Möbius. Or en topologie, on insiste sur les propriétés globales de l'espace – auquel cas le ruban de Möbius et le cylindre diffèrent fondamentalement. Dès lors, au milieu des années 1950, les mathématiciens cherchaient une théorie des faisceaux homologique qui expliquerait comment les caractéristiques globales d'un espace sont reliées à des objets algébriques définis dans cet espace.

Eilenberg pensait également qu'il devait exister une théorie des faisceaux homologique. Mais ni lui ni ses collègues ne parvenaient à en construire une. Seul Grothendieck trouva une solution, en prenant un détour et en considérant d'abord les catégories. Contrairement à Mac Lane et Eilenberg, qui utilisaient les catégories pour résoudre des problèmes particuliers, Grothendieck avait un objectif plus

ambitieux. Il a entrepris de trouver un cadre global qui étendrait la notion de théorie d'homologies. Par cette approche, il ne traitait pas les catégories comme des outils, mais comme une théorie à part entière, fusionnant différentes branches des mathématiques. Il a ainsi mis au jour des connexions entre les connexions et a ainsi compris comment certaines théories d'homologies étaient reliées (il a trouvé des applications qui permettent de passer d'une théorie d'homologie à une autre). Il a aussi développé de toutes nouvelles théories d'homologies, dont une incluant les faisceaux.

Après ces découvertes révolutionnaires, Grothendieck s'est tourné vers un nouveau champ mathématique, la géométrie algébrique, où l'on étudie la géométrie d'objets décrits par des équations polynomiales (telles que  $3x^4y^2 + 2x + 6y^2 + 5 = 0$ ). Là encore, il a profondément transformé la discipline grâce à la théorie des catégories.

Grothendieck a porté la géométrie algébrique à un niveau plus abstrait en étendant les objets d'intérêt au-delà des seuls polynômes, aux «anneaux». Ces structures ressemblent à des groupes, à la différence qu'elles sont munies de deux opérations internes au lieu d'une (comme l'addition et la multiplication). Par exemple, les polynômes (qui peuvent être additionnés ou multipliés entre eux pour donner de nouveaux polynômes) forment un anneau. En étudiant des objets géométriques nommés «schémas», définis non pas forcément par des anneaux de polynômes, mais plus généralement par des anneaux, le mathématicien a mis au jour des connexions inattendues entre la géométrie algébrique et d'autres pans des mathématiques, dont la théorie des nombres.

Grâce aux découvertes de Grothendieck et de bien d'autres qui ont montré la puissance de la théorie des catégories, celle-ci gagna en popularité. Dans sa thèse soutenue en 1963, l'Américain William Lawvere alla même plus loin en suggérant qu'il faudrait bâtir toutes les mathématiques sur la théorie des catégories, plutôt que sur la théorie des ensembles. Il était séduit par cette idée d'un cadre global dans lequel ce n'est pas la nature précise des objets qui compte, mais leurs connexions aux autres. Cependant, peu de mathématiciens ont suivi cette idée. Pour autant, note Tai-Danae Bradley, «de nombreux mathématiciens pensent de cette façon, même s'ils n'utilisent pas explicitement les concepts ou les théorèmes de la théorie des catégories».

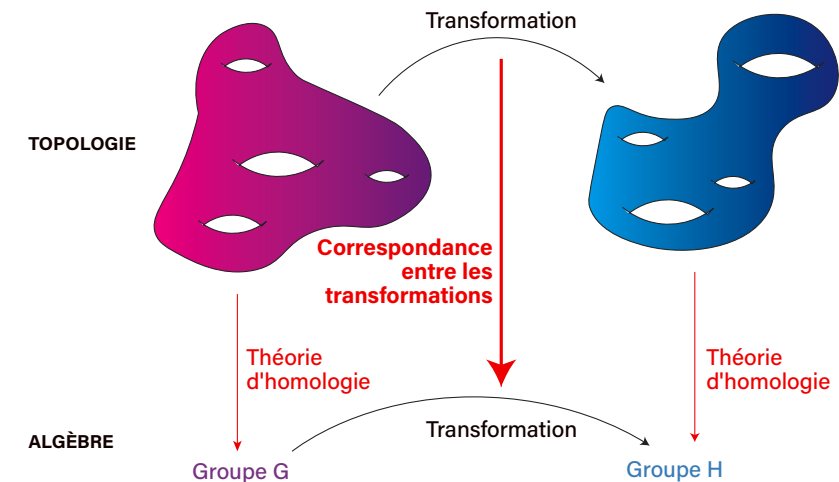
Les différences d'approche de la théorie des ensembles et de la théorie des catégories sont à la source de nombreux débats. Par exemple, la définition de la notion d'équivalence diffère dans les deux cadres. En théorie des ensembles, il est facile de montrer que deux entités sont identiques, car ces objets sont précisément définis.



## HOMOLOGIES ET TRIANGULATION

Un groupe d'homologie est un type de groupe que l'on associe à un espace topologique, car les nombres caractéristiques de ce groupe sont des invariants topologiques de l'espace correspondant. Les mathématiciens ne connaissent pas de méthode générale pour déterminer le groupe d'homologie d'un espace topologique arbitraire, ils l'obtiennent dans des cas particuliers.

Un exemple est celui de la triangulation. Dans le cas d'espaces topologiques simples, par exemple une sphère ou un tore, il est possible de couvrir la surface avec un maillage triangulaire. La surface qui était lisse devient alors un polyèdre avec des sommets, des arêtes et des faces. Or, en 1750, Leonhard Euler avait établi une relation simple donnant le nombre de trous de n'importe quel polyèdre. Ainsi, le nombre de sommets  $S$  moins le nombre d'arêtes  $A$  plus le nombre de faces  $F$  est un invariant topologique de la triangulation, nommé « caractéristique d'Euler » :  $E = S - A + F$ . Pour toute



triangulation d'une sphère, la caractéristique d'Euler est égale à 2, et elle est nulle dans le cas d'un tore. Le nombre de trous est égal à  $1 - E/2$ .

Les sommets, arêtes et faces peuvent aussi être utilisés pour définir des groupes qui servent à construire les groupes d'homologies des espaces topologiques initiaux. Les mathématiciens peuvent donc

numériquement opérer la triangulation et déterminer les groupes d'homologie. Cependant, la triangulation ne peut pas s'appliquer à tous les espaces topologiques. En réalité, cette méthode n'est fiable que pour des espaces à trois dimensions au plus. Au-delà, ces espaces peuvent être si compliqués qu'il est impossible d'appliquer une triangulation. D'autres approches sont alors nécessaires.

En théorie des catégories, les choses se passent différemment, il n'y a pas «les» entiers naturels, mais plutôt «le concept» d'entiers naturels. Dès lors, du point de vue de la théorie des catégories, deux objets sont les mêmes s'ils sont «isomorphes», c'est-à-dire s'il existe une application (et son application réciproque) qui les connecte.

Cette différence est loin d'être anecdotique et a conduit en 2018 à un débat houleux autour d'une démonstration de la fameuse «conjecture ABC», que le Japonais Shinichi Mochizuki affirme avoir résolue. Sa preuve rendue publique en 2012 s'étend sur 500 pages, et s'appuie à son tour sur un deuxième article de près de 500 autres pages. Mais les mathématiciens ont beaucoup de mal à vérifier la preuve de Shinichi Mochizuki, tant son style et ses idées sont atypiques. En 2018, Jakob Stix, de l'université Goethe, à Francfort-sur-le-Main, en Allemagne, et Peter Scholze (lauréat d'une médaille Fields), de l'université de Bonn, ont suggéré qu'ils avaient trouvé une faille dans le raisonnement du Japonais. La contradiction émerge à une étape où il faut traiter comme équivalents ou non deux objets isomorphes. Pour Shinichi Mochizuki, il faut les distinguer, point sur lequel les deux mathématiciens allemands ne sont pas d'accord. La question n'est pas encore tranchée...

Pendant ce temps, de nombreux scientifiques exportent la théorie des catégories vers d'autres disciplines. Elle pourrait aider à mieux comprendre certains systèmes complexes. Par exemple, des physiciens de la matière condensée ont utilisé la théorie des catégories pour décrire

des états exotiques de la matière récemment découverts, les phases topologiques. Les informaticiens, eux, utilisent ces concepts abstraits pour développer de nouveaux langages de programmation, notamment celui nommé Haskell, qui devraient être plus robustes vis-à-vis des erreurs. En s'appuyant sur la théorie des catégories, des biologistes décrivent l'action des enzymes dans des réseaux métaboliques. Des chimistes l'appliquent à l'étude de réactions complexes faisant intervenir de nombreuses molécules. Même les linguistes lui trouvent une utilité, pour détecter des similarités grammaticales entre différentes langues.

### UN PONT ENTRE DISCIPLINES

La théorie des catégories a aussi l'intérêt de rapprocher des chercheurs de différentes disciplines. De la même façon qu'elle a mis en contact les algébristes et les topologues, elle œuvre à présent de façon transdisciplinaire – à condition que les chercheurs aient envie d'apprendre un formalisme étrange et abstrait... Mais cela peut être bénéfique sur le long terme, comme l'a découvert l'informaticien Thorsten Altenkirch, de l'université de Nottingham. «Quand j'ai entendu parler de la théorie des catégories d'ordre supérieur, j'ai eu un réflexe de recul: qui pouvait inventer une chose pareille?, se rappelle-t-il. Et en fait, c'était exactement ce dont j'avais besoin.» Dans certains domaines scientifiques, le niveau d'abstraction de la théorie des catégories est devenu crucial, voire indispensable, pour résoudre des problèmes complexes. ■

### BIBLIOGRAPHIE

T. D. Bradley, **What is applied category theory ?**, prépublication arXiv, 2018 (<https://arxiv.org/abs/1809.05923>).

J. Malgoire, **Grothendieck : un héritage mathématique fertile**, *Pour la Science*, n° 467, pp. 30-37, septembre 2016.

D. I. Spivak, **Category Theory for the Sciences**, MIT Press, 2014.

J. C. Baez et M. Stay, **Physics, topology, logic and computation : A Rosetta stone**, dans *New Structures for Physics* (sous la dir. de B. Coecke), Springer, pp. 95-172, 2011.

J. P. Marquis, **From a Geometrical Point of View**, Springer, 2009.

L'ESSENTIEL

> D'après la théorie des catégories, un objet mathématique est entièrement caractérisé par ses relations à des objets similaires.

> Dans le cas d'un espace topologique, on définit le groupoïde fondamental associé, une catégorie contenant les points et tous les chemins que l'on peut tracer entre deux points dans cet espace.

> Mais les points et les chemins sont des objets de dimensions 0 et 1. Pour sonder des espaces de plus haute dimension, les mathématiciens ont généralisé la notion de groupoïde fondamental à des dimensions infinies.

> Ces nouveaux objets révéleront peut-être de nouvelles pistes pour résoudre les grands problèmes mathématiques du XXI<sup>e</sup> siècle.

L'AUTRICE



**EMILY RIEHL**  
mathématicienne  
à l'université  
Johns-Hopkins,  
à Baltimore,  
aux États-Unis

# Des catégories à l'infini

La théorie des catégories est un outil puissant pour révéler des liens cachés entre objets mathématiques très différents. En généralisant cette approche à des dimensions infinies, les chercheurs créent de nouvelles connexions utiles entre des concepts toujours plus complexes.

Une belle journée d'automne, alors que j'étais une jeune étudiante en mathématiques à l'université Harvard, je marchais le long de l'entrée du métro quand une scène étonnante a attiré mon regard. Un homme se tenait à côté d'un mur sur lequel il avait griffonné quelques énigmes mathématiques. L'une d'elles consistait à demander s'il était possible de construire géométriquement, avec une simple règle (non graduée) et un compas, un cube dont le volume serait exactement le double d'un autre cube donné.

Je connaissais ce problème, qui est en fait très ancien: le philosophe grec Plutarque l'attribuait déjà à Platon il y a plus de deux mille ans. La règle permet de prolonger un segment et le compas permet de dessiner un cercle de n'importe quel rayon autour d'un point donné. Le point clé de cette énigme est que les points et les longueurs du dessin final doivent être présents au départ, ou

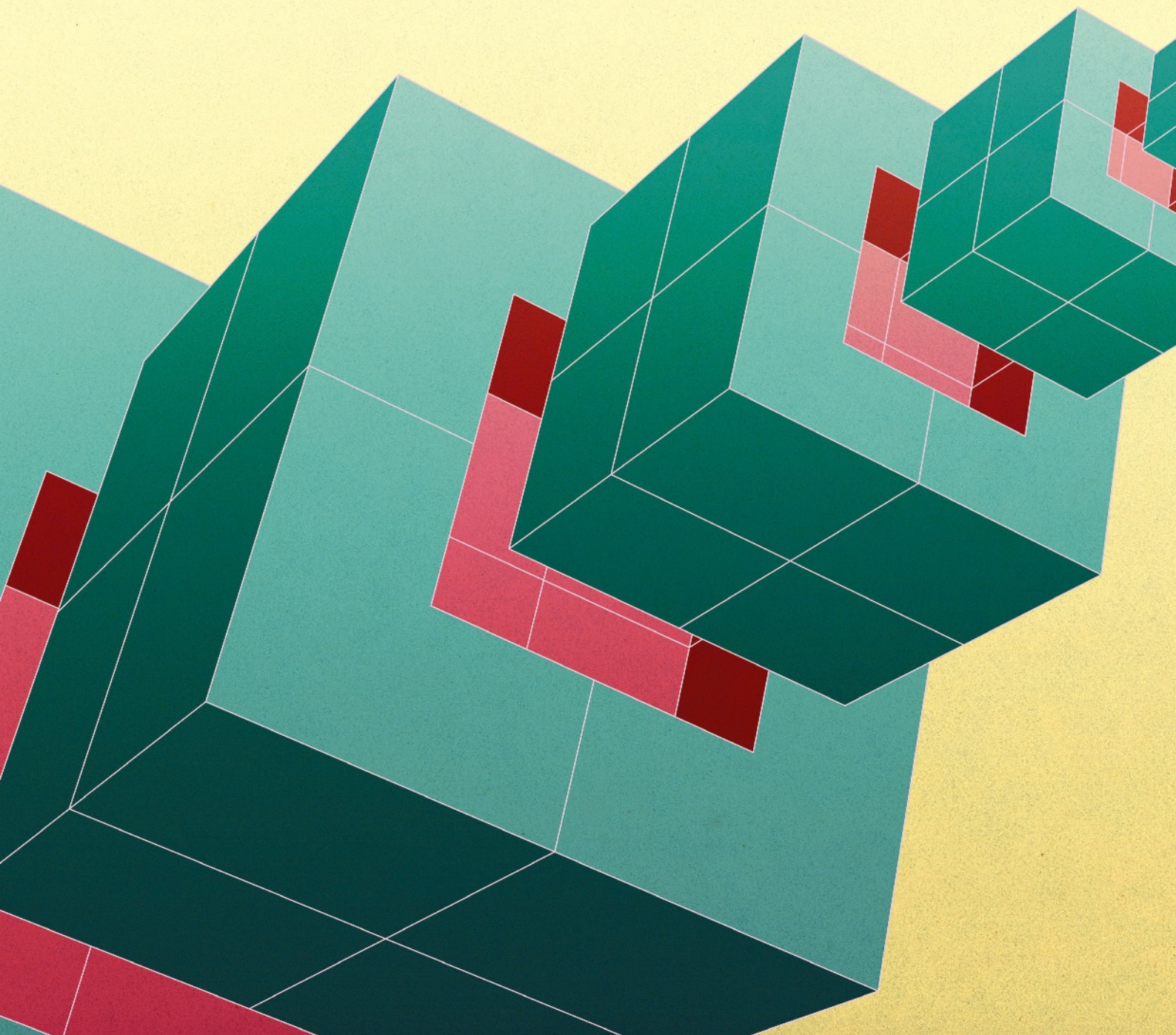
constructibles avec les deux outils du géomètre à partir de la figure initiale.

Pour doubler le volume d'un cube, on commence par une arête de ce cube. Prenons-la comme unité de mesure. Le volume de ce cube initial est donc  $1^3 = 1$ . Pour construire le cube désiré, il faut trouver un moyen de construire un segment de longueur  $\sqrt[3]{2}$  (la racine cubique de 2) à la règle et au compas: un cube ayant ce segment pour arête aura alors un volume égal à 2.

C'est un problème difficile. Si difficile que, depuis qu'il a été énoncé, personne n'a réussi à le résoudre. En fait, en 1837, le mathématicien français Pierre-Laurent Wantzel a démontré l'impossibilité de trouver une solution. Sa preuve s'appuie sur des notions mathématiques très modernes à son époque, dont les fondements ont été développés par un de ses contemporains, Évariste Galois, un prodige des mathématiques mort à vingt ans lors d'un duel (peut-être lié à une affaire de cœur). Au même âge, je n'avais, pour ma part, rien accompli



En généralisant les principes de la théorie des catégories à des dimensions supérieures, les chercheurs espèrent découvrir de nouvelles connexions entre des objets mathématiques éloignés.





d'aussi impressionnant en mathématiques, mais au moins je comprenais la démonstration de Wantzel.

L'idée est la suivante : étant donné un point choisi pour origine et un segment de longueur unité, il est assez simple de construire, à la règle et au compas, tous les points d'une droite dont la distance à l'origine est un nombre rationnel (c'est-à-dire un nombre qui s'exprime comme le rapport de deux nombres entiers).

### UNE QUESTION DE CONSTRUCTIBILITÉ

Plus généralement, Wantzel a prouvé que les coordonnées d'un nouveau point construit seulement avec ces deux outils sont forcément solutions d'une équation polynomiale quadratique (ou du deuxième degré),  $ax^2+bx+c=0$ , où  $a, b$  et  $c$  font partie des nombres déjà construits. On peut donc construire des nombres comme  $\sqrt{2}$ , qui est solution de  $x^2-2=0$ . En revanche,  $\sqrt[3]{2}$  est impossible à obtenir ainsi, car cette valeur est solution d'un polynôme cubique,  $x^3-2=0$ ; or la théorie de Galois, qui utilise la notion d'« extension d'un corps », démontre qu'il est impossible d'obtenir une solution d'un polynôme cubique irréductible en ne s'autorisant qu'à prendre les solutions de polynômes quadratiques.

Galois a en effet travaillé sur la notion de corps, une structure algébrique fondamentale constituée d'un ensemble – par exemple un ensemble de nombres, tel celui des nombres rationnels ou celui des nombres réels – et munie de deux opérations, l'addition et la multiplication (on y définit aussi les opposés et les

inverses, respectivement pour la soustraction et la division). En multipliant ou en additionnant deux éléments d'un corps, on retrouve un nouvel élément du corps.

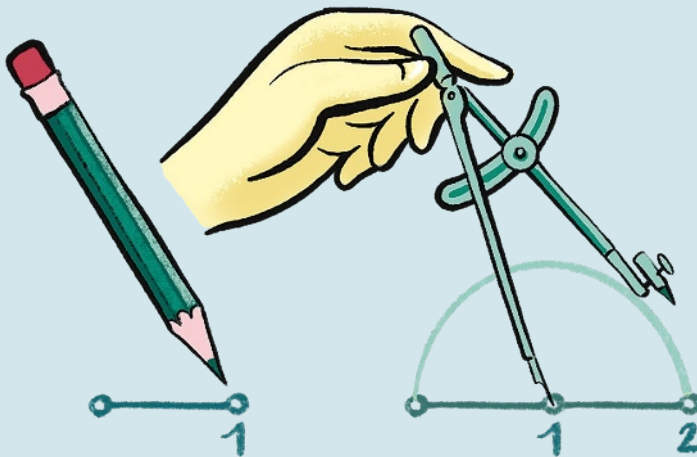
En ajoutant un nouvel élément extérieur à un corps, et en le combinant avec tous les éléments déjà à disposition grâce aux deux opérations, on peut obtenir un nouveau corps, une « extension de corps ». On retrouve ce procédé d'extension dans les nombres constructibles à la règle et au compas : de nouvelles constructions donnent accès à de nouveaux nombres apparaissant dans les coordonnées des points construits. La théorie de Galois associe à chaque extension de corps un entier strictement positif, nommé « degré » et lié au degré des polynômes dont on a extrait des racines pour ajouter ces nouveaux nombres au corps initial. Dans ce cadre, on montre qu'on ne peut pas construire, à la règle et au compas, des nombres qui sont seulement solutions de polynômes cubiques.

Connaissant toutes les subtilités qui se cachent derrière ce problème antique, j'ai entamé une discussion avec la personne qui avait dessiné l'énigme sur le mur. Comme on pouvait s'y attendre, ma tentative d'expliquer pourquoi le problème était insoluble a été un échec. Pour toute réponse, l'homme m'a assuré que mes études m'avaient formatée et m'empêchaient de penser « en dehors des sentiers battus ».

Mais une question a émergé de cette rencontre : comment une étudiante en troisième année avait-elle été capable d'apprendre en quelques semaines des théories aussi abstraites que celle de Galois sur les extensions

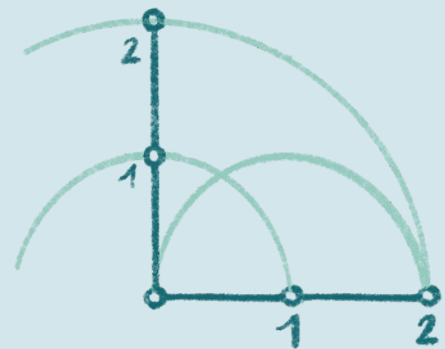
Sauf mention contraire tous les dessins sont de Matteo Farinella

### LES NOMBRES RATIONNELS CONSTRUITS À LA RÈGLE ET AU COMPAS



**Étape 1 :** On utilise le compas pour définir une longueur égale à 1 sur un axe horizontal.

**Étape 2 :** Avec le même écartement du compas, on obtient un segment de longueur 2.



**Étape 3 :** On construit au compas un axe vertical passant par l'origine, puis l'on y marque les distances 1, 2 et 3.



de corps? Plus généralement, tous les concepts que nous manipulons dans notre discipline ont été construits au cours du temps par des géants des mathématiques qui se sont juchés les uns après les autres sur les épaules de leurs prédécesseurs. Aujourd'hui, la richesse des mathématiques modernes donnerait le tournis à Isaac Newton, Gottfried Leibniz, Leonhard Euler ou encore Carl Friedrich Gauss. Comment les mathématiciens font-ils pour absorber aussi rapidement des siècles de savoirs patiemment développés?

## PRENDRE DE LA HAUTEUR

Une partie de la réponse se trouve dans une théorie née au  $xx^e$  siècle: la théorie des catégories. Grâce à un certain niveau d'abstraction, celle-ci donne une sorte de «vue d'ensemble» des mathématiques. En s'intéressant, dans le sens le plus général possible, aux structures mathématiques et à leurs relations, cette théorie permet de considérer que deux objets mathématiques *a priori* distincts sont, d'une certaine façon, «les mêmes», parce qu'ils se comportent de la même manière vis-à-vis des autres objets.

En effet, le théorème fondamental de la théorie des catégories (le lemme de Yoneda) nous dit que tout objet mathématique, qu'il soit simple ou très complexe, est entièrement caractérisé par ses relations avec les autres objets de sa famille: il existe donc un unique objet entretenant précisément ces relations-là avec les autres objets. Grâce à la théorie des catégories, les mathématiciens peuvent donc aborder de nouvelles idées en démontrant des règles générales qui s'appliquent à un large



# Tous les concepts ont été construits par des géants des mathématiques qui se sont juchés les uns après les autres sur les épaules de leurs prédécesseurs

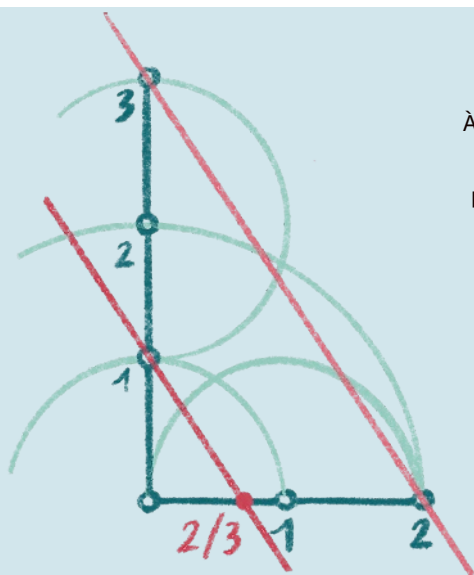


spectre d'objets, sans être obligés de considérer à chaque fois les lois spécifiques du domaine particulier considéré.

Depuis sa naissance, il y a près de soixante-dix ans, la théorie des catégories a fait ses preuves et a démontré son utilité à découvrir des pistes originales pour résoudre certaines grandes conjectures. Cependant, alors que les mathématiques continuent d'évoluer, les chercheurs dans ce domaine ont eu le sentiment que l'idée que deux objets sont «les mêmes» a elle aussi évolué. Depuis une vingtaine d'années, de nombreux mathématiciens, dont je fais partie, ont travaillé sur une version étendue de la théorie des catégories capable de prendre en compte une notion généralisée de l'unicité d'un objet défini par ses relations.

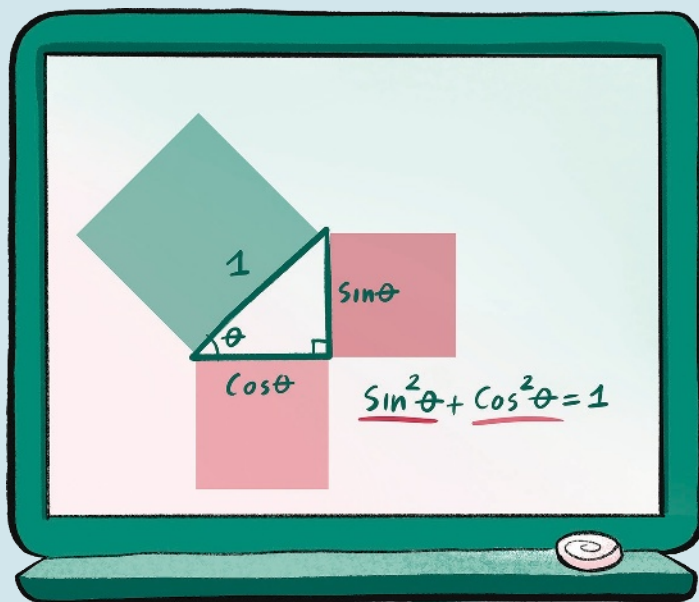
Ces nouvelles catégories, les «infini-catégories» (on écrit parfois « $\infty$ -catégories»), élargissent le champ de la théorie. Le langage des infini-catégories offre des outils puissants pour étudier des problèmes où les relations entre objets sont trop subtiles pour être analysées à l'aide la théorie des catégories classique. Cette «prise de recul à l'infini» offre une nouvelle façon de voir et penser les anciens concepts mathématiques, tout en ouvrant de nouvelles perspectives.

Comme de nombreux mathématiciens que je connais, j'ai été attirée par la théorie des catégories en partie parce que j'avais une mauvaise mémoire. Cela a tendance à surprendre mes interlocuteurs, qui se souviennent des mathématiques à l'école comme une longue liste de relations à apprendre par cœur, les



**Étape 4:** On relie le point 2 de l'axe horizontal et le point 3 de l'axe vertical par une droite. À l'aide du compas, on construit une droite perpendiculaire à celle-ci passant par l'origine, puis une droite perpendiculaire à cette dernière passant par le point 1 sur l'axe vertical. Cette dernière coupe l'axe horizontal au point  $2/3$ . Cette méthode permet de construire tous les nombres rationnels.

## LE THÉORÈME DE PYTHAGORE



formules trigonométriques par exemple. Mais j'avais très tôt compris que la plupart des formules trigonométriques les plus utilisées peuvent se retrouver à partir d'une seule relation,  $\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$ , qui a elle-même une explication très élégante : c'est le théorème de Pythagore appliqué à un triangle rectangle dont l'hypoténuse est de longueur 1 et qui a un angle aigu égal à  $\theta$ .

Cette vision utopique des mathématiques où tout s'explique et rien ne doit être mémorisé est mise à mal quand on arrive à l'université. À cette étape de leur parcours, les étudiants se retrouvent confrontés à une avalanche de concepts à maîtriser et qui ont été inventés au cours des derniers siècles.

### UNE AVALANCHE DE CONCEPTS

Par exemple, les «groupes», «anneaux» et «corps» appartiennent au domaine de l'algèbre, un mot dérivé du titre d'un livre écrit au IX<sup>e</sup> siècle par le mathématicien et astronome persan Muhammad Ibn Mūsā al-Khwarizmi, parfois traduit en *Abrégé du calcul par la restauration et la comparaison*. Au cours du millénaire qui a suivi, l'algèbre s'est fortement développée : alors qu'elle consistait initialement à étudier les solutions d'équations polynomiales, elle a fini par se préoccuper de systèmes de nombres plus abstraits.

Par exemple, puisque aucun nombre réel  $x$  ne vérifie l'équation  $x^2 + 1 = 0$ , les mathématiciens ont construit un nouveau système de nombres – aujourd'hui connus sous le nom de «nombres complexes» – en ajoutant un nombre imaginaire noté  $i$  et en imposant l'égalité  $i^2 + 1 = 0$ .

L'algèbre n'est que l'une des disciplines du cursus d'un étudiant en mathématiques. Parmi les autres sujets importants, on trouve la topologie (l'étude abstraite de l'espace) et l'analyse,

qui a commencé par la formalisation rigoureuse de l'étude des fonctions réelles avant de s'aventurer sur des terrains plus exotiques comme les espaces probabilisés, les variables aléatoires, les variétés complexes, les fonctions holomorphes... Comment un étudiant est-il censé comprendre tout cela en même temps ?

Il existe, en mathématiques, un phénomène assez paradoxal : celui de la simplification par l'abstraction. Comme l'écrit la mathématicienne britannique Eugenia Cheng dans son ouvrage *The Art of Logic in an Illogical World*, «une propriété puissante de l'abstraction est que de nombreuses situations *a priori* différentes deviennent les mêmes lorsqu'on omet certains détails.»

L'algèbre moderne est née au début du XX<sup>e</sup> siècle, lorsque les mathématiciens ont décidé de définir un cadre qui unifie les nombreux exemples de structures algébriques apparaissant dans l'étude des solutions d'équations polynomiales ou dans celle des configurations de figures géométriques dans le plan. Pour relier les études de ces différentes structures, les chercheurs ont identifié les axiomes fondamentaux qui décrivent leurs propriétés communes. C'est donc pour dépasser un simple empilement d'exemples ou de constructions particulières que les groupes, anneaux et corps ont été définis et intégrés à l'univers des mathématiques, en même temps que l'idée selon laquelle un objet mathématique peut être décrit par ses propriétés, et compris de façon abstraite.

Le mathématicien britannique John Conway, disparu récemment, a beaucoup médité et écrit sur l'ontologie singulière des objets mathématiques : «Il n'y a aucun doute qu'ils existent, mais on ne peut les examiner minutieusement que par la pensée. C'est assez étonnant, et je ne le comprends toujours pas, bien qu'ayant été mathématicien toute ma vie. Comment des choses peuvent-elles être là sans réellement être là?»

Mais cet univers d'objets mathématiques qui peuvent exister sans réellement être là a engendré un problème : un tel monde est nettement trop vaste pour qu'un être humain puisse le comprendre. Même en se restreignant à l'algèbre, il y a tout simplement beaucoup trop d'objets mathématiques pour qu'on ait le temps de tous les étudier. Au tournant du XX<sup>e</sup> siècle, les mathématiciens ont commencé à étudier ce qu'on nomme l'«algèbre universelle». Elle se fonde sur un ensemble abstrait (qui peut représenter, par exemple, une collection de symétries, ou de nombres dans un certain système), associée à diverses opérations entre les éléments de cet ensemble (comme l'addition ou la multiplication dans le cas du corps déjà évoqué) et satisfaisant une liste d'axiomes naturels tels que l'associativité, la commutativité ou la distributivité.



Une fois ce cadre général posé, en faisant différents choix – l'opération est-elle définie seulement sur certains éléments ou sur tous? Est-elle inversible? –, on retrouve, selon les cas, les diverses structures algébriques usuelles, notamment les groupes, anneaux et corps. Mais l'algèbre universelle n'est pas restreinte à ces choix, qui ne représentent qu'une infime partie d'un éventail infini de possibilités.

La prolifération de nouveaux objets mathématiques apporte sa propre complexité. Une façon de simplifier l'étude est d'introduire un niveau supplémentaire d'abstraction où, étonnamment, on peut démontrer des théorèmes s'appliquant simultanément à une grande variété d'objets mathématiques sans avoir à spécifier exactement de quels types d'objets on parle.

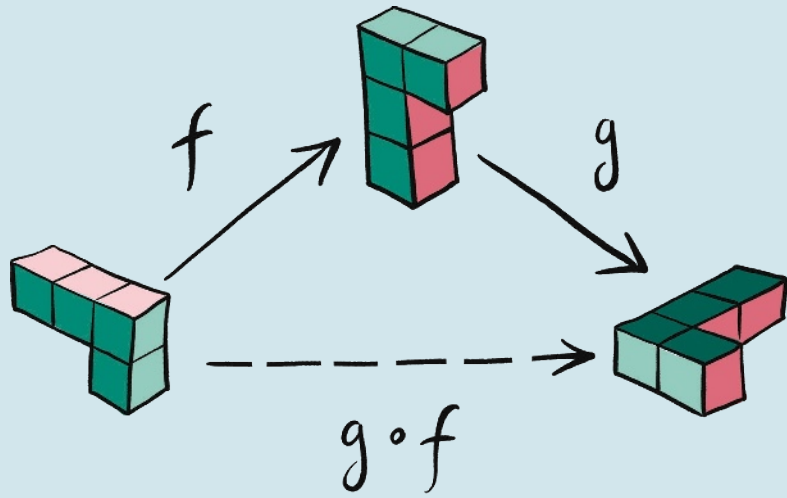
C'est précisément ce que fait la théorie des catégories, fondée dans les années 1940 par les mathématiciens américains Samuel Eilenberg et Saunders Mac Lane (voir l'article pages 30 à 37). Bien qu'elle ait été introduite à l'origine pour donner une définition rigoureuse de l'expression «équivalence naturelle», elle offre aussi un moyen de penser de façon universelle à l'algèbre universelle ainsi qu'à d'autres domaines des mathématiques. Dans le langage d'Eilenberg et de Mac Lane, on envisage maintenant chaque type d'objet mathématique comme faisant partie d'une catégorie, qui est une collection bien définie d'objets et de transformations entre ces objets, simplement représentées par des flèches (le terme technique pour les désigner est «morphisme» ou tout simplement «flèches»).

Par exemple, le domaine de l'algèbre linéaire consiste en l'étude des espaces vectoriels abstraits comme l'espace euclidien tridimensionnel (qui correspond à notre perception de l'espace physique). Dans la catégorie des espaces vectoriels, les transformations considérées se nomment «applications linéaires», et chacune d'elles a un espace de départ et un espace d'arrivée bien définis, indiquant quels types de vecteurs sont pris en entrée et quels types sont renvoyés par l'application.

## D'UNE TRANSFORMATION À L'AUTRE

De plus, dans toute catégorie, les transformations peuvent, comme des fonctions classiques, être «composées», ce qui signifie qu'on peut appliquer une transformation au résultat d'une autre transformation. Pour toute paire de transformations, constituée de  $f: A \rightarrow B$  (lire « $f$  est une transformation de  $A$  vers  $B$ ») et  $g: B \rightarrow C$ , la catégorie indique une unique transformation composée, notée  $g \circ f: A \rightarrow C$  (la «composée de  $f$  et  $g$  est une transformation de  $A$  vers  $C$ »). Notons que la composition n'est possible que si l'ensemble de départ de  $g$  est identique à l'ensemble d'arrivée de  $f$ .

## COMPOSITION DE DEUX TRANSFORMATIONS



On ajoute l'axiome naturel selon lequel cette loi de composition doit être associative, ce qui signifie que si  $f, g$  et  $h$  sont des applications composables entre elles dans cet ordre, les deux façons de les composer successivement coïncident:  $h \circ (g \circ f) = (h \circ g) \circ f$ .

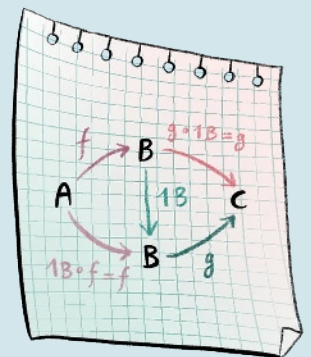
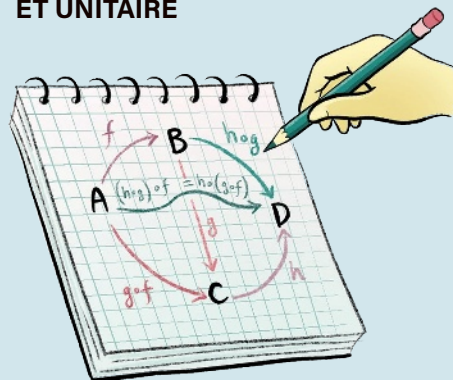
Enfin, cette loi doit être «unitaire»: chaque objet  $B$  possède une transformation nommée «identité», couramment notée  $1_B$  («l'identité de  $B$ ») et ayant pour propriété fondamentale  $g \circ 1_B = g$  et  $1_B \circ f = f$ , pour  $g$  et  $f$  des transformations dont, respectivement, l'ensemble de départ et l'ensemble d'arrivée est  $B$ .

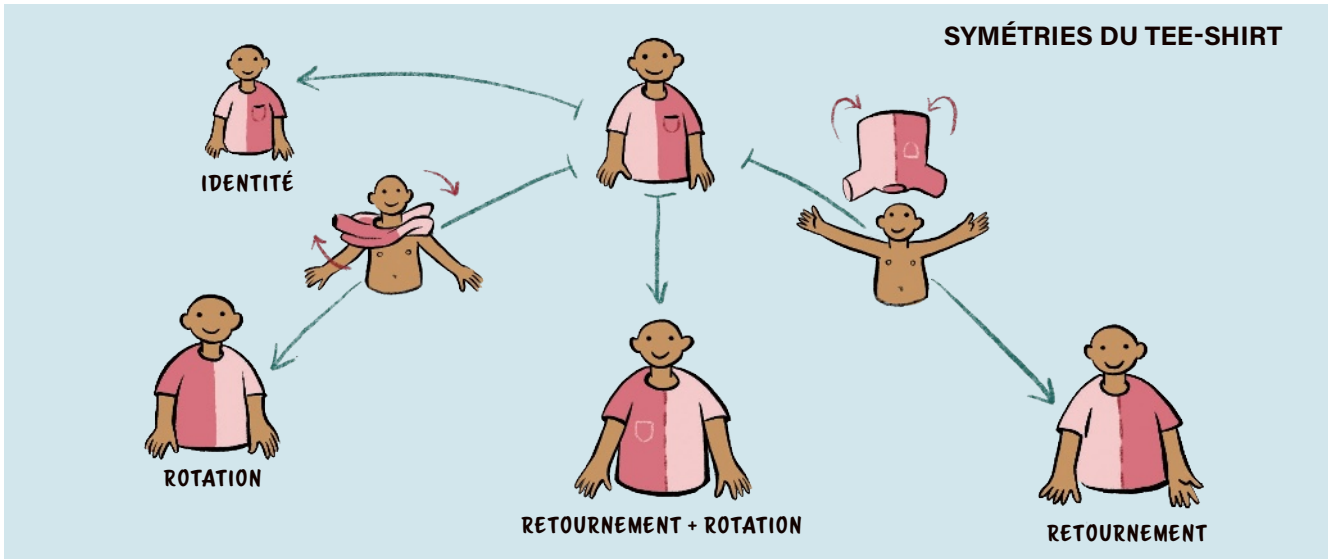
Alors que des collections de structures algébriques définies en algèbre universelle peuvent être distinctes les unes des autres, les catégories que ces objets habitent présentent des similarités que le langage des catégories permet d'exprimer précisément. Ainsi, ces similitudes, telles des analogies, relient entre eux certains concepts et réduisent énormément la quantité de notions nécessaires à comprendre, surtout dans certains domaines.

Avec suffisamment d'expérience, les mathématiciens savent en partie à quoi s'attendre lorsqu'ils rencontrent un nouveau type de structure algébrique. Cette idée se retrouve dans les manuels modernes d'algèbre, qui présentent successivement la théorie des groupes, celle des anneaux et celle des espaces vectoriels, essentiellement parce que ces théories sont semblables. Il existe d'autres analogies, plus lâches, entre ces catégories et celles que l'on rencontre en topologie ou en analyse, et ces similitudes facilitent l'absorption plus rapide de nouvelles connaissances.

Ces motifs répétés permettent alors d'appréhender rapidement de nouveaux objets et de consacrer ensuite plus de temps à explorer les questions particulières qui les distinguent – bien que les progrès de la recherche

## LA LOI DE COMPOSITION EST ASSOCIATIVE ET UNITAIRE





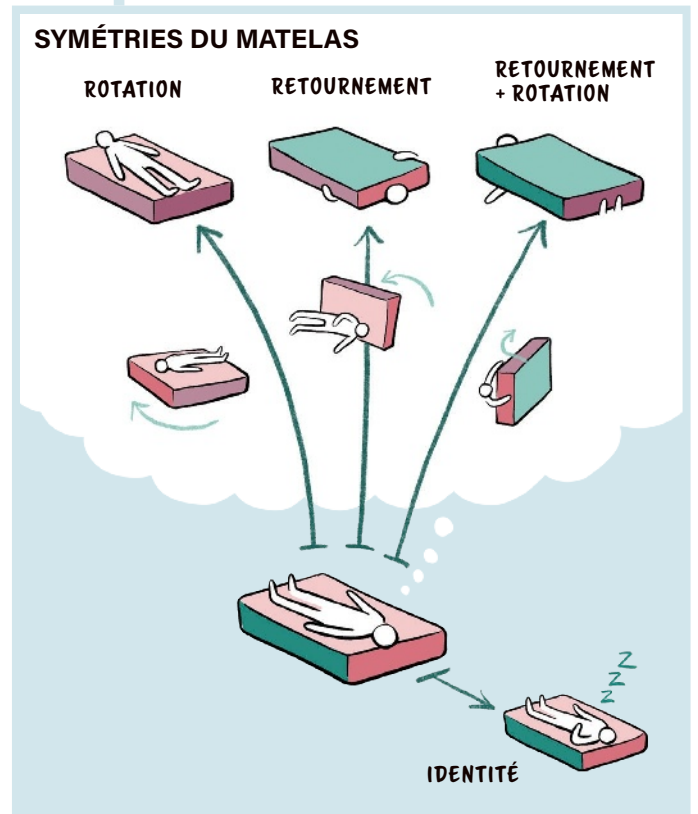
mathématique soient souvent inspirés par des analogies nouvelles et surprenantes entre des domaines auparavant non reliés.

Les niveaux d'abstraction imbriqués, qui vont des structures mathématiques concrètes aux systèmes axiomatiques qui les généralisent, puis aux objets généraux appartenant aux catégories, présentent un nouveau défi: dire qu'un objet est «le même» qu'un autre n'a plus un sens clair. Prenons l'exemple d'un groupe, qui peut être envisagé comme un ensemble de symétries dont Amie Wilkinson, mathématicienne à l'université de Chicago, aime décrire les éléments comme des «mouvements» qui retournent ou mettent en rotation un objet pour le replacer dans une position analogue à sa position initiale.

Par exemple, examinons les symétries d'un tee-shirt. Une première symétrie possible est le mouvement «identité» (ou l'absence de mouvement), où une personne porte le tee-shirt comme il est habituellement porté. Une autre symétrie correspond au mouvement par lequel le porteur sort ses bras des manches et, avec le tee-shirt toujours autour du cou, le tourne de 180 degrés horizontalement pour mettre ses bras dans les manches opposées: le tee-shirt présente toujours sa face externe, mais est porté à l'envers. Une autre symétrie encore correspond à retirer entièrement le tee-shirt, échanger son intérieur et son extérieur, et le remettre de façon que chaque bras passe par la même manche qu'à l'origine. Le tee-shirt se retrouve donc ici à l'envers de deux façons en même temps: sont échangés l'intérieur et l'extérieur, ainsi que l'avant et l'arrière. Enfin, une dernière symétrie combine les deux mouvements précédents. Remarquons d'ailleurs que ces derniers peuvent être combinés dans n'importe quel ordre en donnant le même résultat, ce qui n'est pas forcément le cas dans d'autres

groupes. Chacun de ces quatre «mouvements» compte comme une symétrie, car il agit sur le tee-shirt en conservant la façon dont il est porté.

Un autre exemple de groupe facile à représenter est le groupe des «retournements d'un matelas», qui décrit les symétries d'un matelas. En plus du mouvement d'identité, qui laisse le matelas en place, on peut faire tourner le matelas pour échanger dessus et dessous, ou pour échanger tête et pieds à plat; et l'on peut effectuer ces deux mouvements successivement. Notons qu'avec un matelas carré, il y aurait eu





encore d'autres symétries possibles, comme la rotation d'un quart de tour à plat.

Bien qu'un matelas n'ait pas grand-chose à voir avec un tee-shirt, les deux groupes que nous venons de décrire ont, en un certain sens, le même contenu, la même « forme ». Premièrement, il y a le même nombre de symétries (4) dans chaque groupe, et on peut mettre en correspondance les symétries des deux groupes (associer l'identité à l'identité, la rotation du tee-shirt avec la rotation tête-pieds du matelas, le retournement du tee-shirt avec le retournement du matelas, et de même pour le dernier mouvement composé).

## DES SYMÉTRIES ISOMORPHES

Par ailleurs, si l'on prend deux symétries d'un de ces groupes et qu'on les exécute successivement (qu'on les compose), la position finale de l'objet correspond au résultat d'une des quatre symétries du groupe. On note que si l'on prend les deux symétries dans l'autre groupe correspondant aux deux symétries initiales du premier groupe et qu'on les enchaîne de la même façon, la symétrie finale correspond aussi à celle du premier groupe. En termes techniques, ces groupes sont donc reliés par un « isomorphisme », un terme dont l'étymologie parle d'elle-même – en grec, *isos* signifie « même » et *morphê*, « forme ».

On définit en fait la notion d'isomorphisme dans toute catégorie, ce qui permet de transposer ce concept d'un contexte mathématique à un autre. En toute généralité, un isomorphisme entre deux objets  $A$  et  $B$  (par exemple ici les symétries de retournement du tee-shirt et du matelas) d'une catégorie est une paire de transformations  $f: A \rightarrow B$  et  $g: B \rightarrow A$  telle que les deux compositions  $g \circ f$  et  $f \circ g$  sont les transformations identités respectives des objets  $A$  et  $B$  (autrement dit,  $g \circ f = 1_A$  et  $f \circ g = 1_B$ ).

Dans la catégorie des espaces topologiques (des espaces dans lesquels est définie une notion de « proximité » entre les points), la notion d'isomorphisme correspond à une paire de fonctions continues inverses l'une de l'autre. Ici, « continue » signifie, intuitivement, que les fonctions ne font pas de « saut », c'est-à-dire que si  $x$  varie peu, alors  $f(x)$  varie peu également. Par exemple, il existe une déformation continue qui transforme un beignet (de forme annulaire) en une tasse à café: le trou du beignet devient l'anse de la tasse, qui est formée en aplatissant le beignet pour le rendre plus fin. Afin que la déformation soit continue, elle ne doit impliquer ni déchirure ni recollement.

Cet exemple de deux espaces qui sont continûment déformables l'un en l'autre a inspiré la boutade selon laquelle un topologue ne sait pas faire la différence entre une tasse à café et un beignet: en tant qu'espaces abstraits, ces objets sont les mêmes. En pratique, les

topologues attribuent parfois un sens encore plus souple à l'identification de deux espaces, deux espaces étant considérés comme identiques s'ils sont simplement « homotopiquement équivalents ». Cette identification correspond à la notion d'isomorphisme dans une autre catégorie, plus exotique que celle déjà évoquée: la catégorie homotopique des espaces topologiques.

Concrètement, qu'est-ce qu'une équivalence d'homotopie? C'est un autre type de déformation continue, plus souple, dans laquelle il est possible de recoller plusieurs points distincts en un seul, sans toutefois créer et reboucher des trous. Par exemple, imaginons qu'on parte d'un pantalon et qu'on en réduise la longueur des jambes à néant pour obtenir un « string ». Cet autre espace est doté de la même structure topologique fondamentale – il y a toujours deux trous pour les jambes –, même si le vêtement bidimensionnel originel a été réduit à un bout de ficelle unidimensionnel.

Un autre exemple d'équivalence d'homotopie, plus surprenant, est celui qui réduit l'étendue infinie de l'Univers euclidien tridimensionnel à un seul point, à travers une sorte de « Big Bang inversé » dans lequel chaque point de l'espace est relié à l'origine du repère, par exemple par le chemin le plus court (le segment reliant les deux points), la vitesse de ce mouvement étant proportionnelle à la distance séparant chaque point et l'origine, avant le Big Bang inversé. Un espace homotopiquement équivalent à un point est dit « contractile ».

L'idée selon laquelle il est possible de remplacer un objet mathématique par un autre qui lui est isomorphe sans changer fondamentalement la nature d'une construction ou d'un argument a pris tant de place en mathématiques que les catégoriciens ont fini par donner à l'article défini « le » ou « la » un sens plus proche de l'article indéfini « un ».

Par exemple, en théorie des ensembles, il existe un concept élémentaire connu sous le nom d'« union disjointe » de deux ensembles  $A$  et  $B$ . Comme l'union ordinaire  $A \cup B$ , l'union disjointe  $A \sqcup B$  comporte une copie de chaque élément de  $A$  et une copie de chaque élément de  $B$ . Cependant, contrairement à l'union ordinaire, si  $A$  et  $B$  ont un élément en commun, alors l'union disjointe  $A \sqcup B$  possède deux copies de cet élément, dont l'une « se souvient » en quelque sorte qu'elle provient de  $A$ , et l'autre « se souvient » qu'elle provient de  $B$ .

Il existe de nombreuses façons de construire l'union disjointe de deux ensembles en utilisant les axiomes de la théorie des ensembles. Ces différentes constructions ne produiront pas des ensembles strictement identiques, mais ils seront nécessairement isomorphes. Plutôt que de perdre du temps à débattre pour savoir quelle

## GLOSSAIRE

**Catégorie** : Collection bien définie d'objets de même nature et de transformations entre eux, munie d'une loi de composition.

**Composition** : Opération consistant à appliquer une transformation à la suite d'une autre.

**Identité** : L'unique transformation d'un objet en lui-même et qui ne le modifie d'aucune façon.

**Symétrie** : Transformation inversible d'un objet.

**Isomorphisme** : Notion structurelle de « similitude » qui peut exister entre deux objets d'une catégorie.

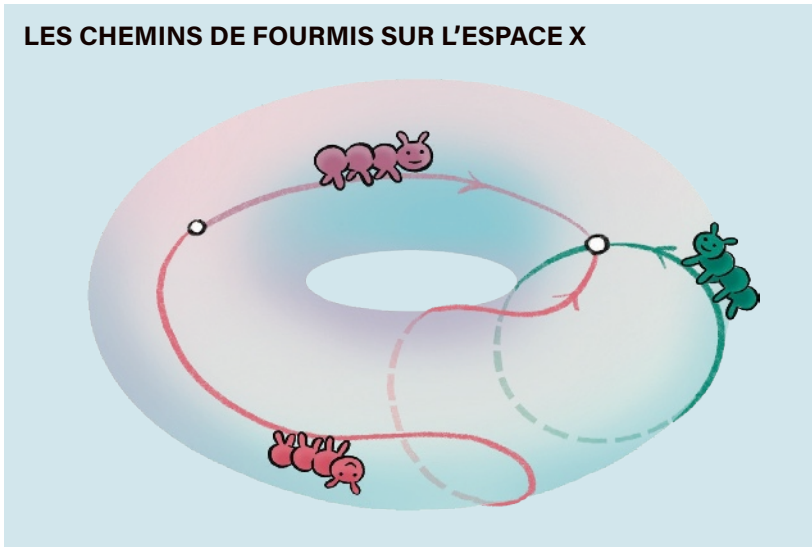
**Groupeïde fondamental** : Catégorie associée à un espace topologique, dont les objets sont les points de l'espace, et dont les transformations sont les chemins dans l'espace, ces derniers étant considérés à homotopie près.

**Homotopie** : Un « chemin entre deux chemins », défini par une déformation continue de l'un vers l'autre.

**Infini-catégorie** : Analogue en dimension infinie d'une catégorie, avec des transformations en dimension supérieure et une loi de composition vérifiant des propriétés plus faibles.

**Infini-groupeïde fondamental** : Infini-catégorie constituée de points, de chemins, d'homotopies et d'homotopies supérieures dans un espace.

LES CHEMINS DE FOURMIS SUR L'ESPACE X



construction est la plus « canonique » (la plus « classique »), il est plus pratique d'ignorer cette ambiguïté et de parler de « l'union disjointe » pour désigner n'importe quel ensemble particulier qui satisfait la « propriété universelle » caractérisant l'union disjointe (et qui formalise la description intuitive que nous venons de donner de l'union disjointe). Pour reprendre les exemples des symétries du tee-shirt et du matelas, les mathématiciens désignent ces deux groupes de symétrie sous le même nom de « groupe de Klein », du nom du mathématicien allemand Felix Klein.

L'IMPORTANCE DES RELATIONS

D'après une histoire maintes fois contée, le résultat fondamental de la théorie des catégories, le lemme de Yoneda, aurait été énoncé pour la première fois en 1954, à la gare du Nord, à Paris. Le jeune mathématicien Nobuo Yoneda y aurait commencé à décrire son « lemme » (c'est-à-dire un théorème directement appliqué à la démonstration d'un autre théorème) à Mac Lane, sur le quai, et l'aurait poursuivi dans le train jusqu'au départ de celui-ci. Le lemme, rappelons-le, assure que tout objet dans une catégorie quelconque est entièrement déterminé par ses relations aux autres objets de la même catégorie, ces relations étant les transformations vers ou depuis cet objet. On peut donc caractériser entièrement un espace topologique  $X$  en le « testant » grâce à toutes les fonctions continues de type  $f: T \rightarrow X$  partant d'un autre espace  $T$ .

Par exemple, comment retrouver les points de  $X$  à partir de fonctions continues de cette forme ? Il se trouve que les points de  $X$  sont en correspondance parfaite avec les fonctions continues de la forme  $f: * \rightarrow X$ , où  $*$  est l'espace à un seul point. En effet, si  $x$  est un point de  $X$ , on peut construire la fonction qui à  $y$ , l'unique

point de l'espace  $*$ , associe  $x$ , et qui est ainsi entièrement déterminée et continue. Dans l'autre sens, si  $f: * \rightarrow X$  est une fonction continue, il suffit de prendre  $f(y)$  comme point de  $X$ , et cette correspondance est dite « bijective », c'est-à-dire qu'elle associe à chaque point de  $X$  une unique fonction de la forme voulue.

Voici un autre exemple de question à laquelle il est possible de répondre en examinant les fonctions continues vers  $X$ . Il existe une notion sur les espaces topologiques nommée « connexité par arcs », qui décrit le fait que  $X$  est « d'un seul tenant », au sens où il n'est pas séparé en deux blocs distincts impossibles à relier. La connexité par arcs de  $X$  est définie formellement en considérant les fonctions continues  $p: I \rightarrow X$ , où  $I$  est l'intervalle  $[0, 1]$  des nombres réels compris entre 0 et 1. Une fonction de cette forme définit donc un « chemin » paramétré continu dans l'espace  $X$  du point  $p(0)$  au point  $p(1)$ , que l'on peut voir comme la trajectoire possible qu'une fourmi pourrait emprunter entre ces points en se promenant dans l'espace  $X$ . Plus précisément,  $X$  est connexe par arcs lorsqu'il est possible de relier toute paire de points par un tel chemin continu.

On peut plus généralement utiliser les points et les chemins d'un espace pour traduire des questions topologiques en des problèmes algébriques, en associant à chaque espace topologique  $X$  une catégorie notée  $\pi_1(X)$  et nommée le « groupoïde fondamental » de  $X$ . Cette structure est une catégorie proche d'un groupe, mais dont tous les éléments ne peuvent pas être composés, d'où le terme « groupoïde ». En effet, ses objets sont par définition les points, et les transformations sont les chemins entre les points, que l'on a construits précédemment avec les fonctions  $p: I \rightarrow X$ . On ne peut alors composer deux chemins (vus comme des transformations) que si l'arrivée du premier coïncide avec le départ du second. En outre, si un chemin peut être déformé en un autre en laissant fixes les deux extrémités, les chemins définissent la même transformation. Il faut



**Le lemme de Yoneda  
aurait été énoncé  
pour la première fois  
à la gare du Nord,  
à Paris**





nécessairement prendre en compte ces déformations de chemins, techniquement nommées «homotopies», pour que la composition de chemins définisse une opération associative, comme l'exige une catégorie.

Un avantage clé de la construction des groupoïdes fondamentaux est qu'elle est «fonctorielle», ce qui signifie qu'une fonction continue entre deux espaces topologiques,  $f: X \rightarrow Y$ , donne naissance à une transformation correspondante notée  $\pi_1(f): \pi_1(X) \rightarrow \pi_1(Y)$  entre les groupoïdes fondamentaux des espaces. Cette assignation respecte la composition et les identités, ce qui signifie respectivement qu'on a les formules  $\pi_1(g \circ f) = \pi_1(g) \circ \pi_1(f)$  et  $\pi_1(1_X) = 1_{\pi_1(X)}$ . Ces deux propriétés, résumées sous le nom de «fonctorialité», suggèrent que les groupoïdes fondamentaux reflètent certaines informations essentielles sur les espaces topologiques. En particulier, si deux espaces topologiques sont équivalents du point de vue de l'homotopie, alors leurs groupoïdes fondamentaux sont nécessairement isomorphes.

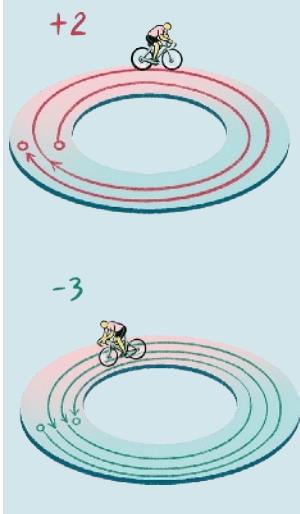
Mais les groupoïdes fondamentaux ne sont cependant pas tous isomorphes. Par exemple, ils permettent de faire une distinction nette entre un disque et son cercle extérieur.

Dans le groupoïde fondamental du cercle, si l'on fixe un point, on peut par exemple décrire facilement les trajectoires partant de ce point et revenant à ce point de départ, grâce à un unique nombre entier relatif qui encode le «nombre de tours» faits par la trajectoire (avec un signe, choisi arbitrairement, pour un tour dans le sens horaire, et le signe opposé pour un tour dans le sens antihoraire). Ici, dans une trajectoire, de petits allers-retours entre deux points proches sur le cercle ne contribueraient pas à ce nombre de tours, car on peut les effacer totalement en déformant continûment la trajectoire par homotopie. L'entier associé à une trajectoire, lui, décrit le «vrai» nombre de tours effectués par la trajectoire, et, si deux chemins ne font pas le même nombre de tours, alors ils ne sont pas déformables l'un en l'autre. Le groupoïde fondamental «contient» donc au moins l'ensemble des entiers relatifs.

À l'inverse, dans le groupoïde fondamental du disque, il n'existe, à homotopie près, qu'un seul chemin entre toute paire de points. Ces deux groupoïdes fondamentaux ne sont donc pas identiques. Enfin, le groupoïde fondamental d'une sphère (creuse) a la même propriété: il y a un unique chemin entre deux points à homotopie près.

Un problème se pose à propos du groupoïde fondamental: les points et chemins qu'il englobe ne donnent aucune information sur la structure d'un espace dans les dimensions supérieures à 1, car un point et un chemin sont eux-mêmes de dimensions 0 et 1 respectivement.

## LE GROUPOÏDE FONDAMENTAL DU CERCLE



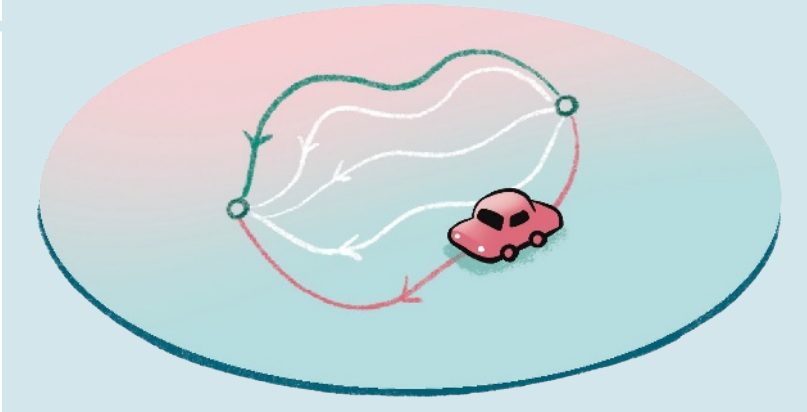
Une solution pour saisir les propriétés des espaces en plus haute dimension est de remarquer que l'intervalle  $I$ , espace de départ des chemins continus  $p: I \rightarrow X$  utilisés pour construire le groupoïde fondamental  $\pi_1(X)$ , est ce qu'on nomme techniquement une «boule» (pleine) de dimension 1. Cela se généralise aisément en dimension supérieure: on peut considérer les fonctions continues allant de la boule usuelle de dimension 2 (le disque) vers  $X$  (nommées «homotopies», il s'agit en fait de la même notion d'homotopie que celle déjà décrite), celles allant de la boule de dimension 3 vers  $X$ , et ainsi de suite avec toutes les dimensions supérieures (nommées «homotopies supérieures»), puis rassembler toutes ces fonctions dans une même structure.

Une question naturelle vient alors à l'esprit: quel type de structure algébrique forment ensemble les points, chemins, homotopies et homotopies supérieures? Cette structure, notée  $\pi_\infty(X)$  («pi-infini de  $X$ ») et nommée «infini-groupoïde fondamental de  $X$ », est justement un exemple d'infini-catégorie, l'analogue en dimension infinie des catégories introduites par Eilenberg et Mac Lane, et présentées au début de cet article.

## VERS L'INFINI...

Comme une catégorie ordinaire, une infini-catégorie comporte des objets et des transformations représentées par des flèches unidimensionnelles, mais aussi des «transformations supérieures» représentées par des flèches bidimensionnelles, tridimensionnelles, etc. Par exemple, dans  $\pi_\infty(X)$ , les objets et les flèches sont respectivement les points et les chemins (pas à déformation près, ici), et les transformations supérieures encodent les homotopies supérieures. En particulier, on retrouve donc la notion d'homotopie entre deux chemins, représentée cette fois par une flèche bidimensionnelle reliant deux flèches classiques.

## LE GROUPOÏDE FONDAMENTAL DU DISQUE



Toujours comme dans une catégorie ordinaire, il existe une composition entre des flèches de même dimension: si on a deux flèches  $f: X \rightarrow Y$  et  $g: Y \rightarrow Z$ , alors il doit aussi exister une flèche  $g \circ f: X \rightarrow Z$ . Tout semble bien fonctionner, mais attention, une subtilité technique complexifie ici la situation. En effet, pour définir l'infini-groupeïde fondamental d'une façon utile, il est nécessaire d'affaiblir les axiomes sur la composition. Plus précisément, pour toute paire de flèches composables, on demande qu'il existe toujours une composition, mais elle n'est pas forcément unique: elle n'est unique qu'à homotopie supérieure près, ce qui signifie concrètement que deux compositions de  $f$  et  $g$  sont forcément reliées par une homotopie supérieure.

Ce défaut d'unicité fait qu'il est difficile de définir les infini-catégories en utilisant seulement les fondements classiques des mathématiques qui reposent sur la théorie des ensembles, car la composition ne se comporte plus exactement comme les opérations qui apparaissent dans l'algèbre universelle. En conséquence, bien que les infini-catégories soient de plus en plus au cœur de la recherche moderne dans de nombreux domaines des mathématiques, de la théorie quantique des champs à la géométrie algébrique en passant par la topologie algébrique, elles sont souvent considérées comme trop difficiles à définir et à manipuler par la plupart des mathématiciens qui n'en sont pas spécialistes. Elles sont d'ailleurs rarement enseignées aux étudiants.

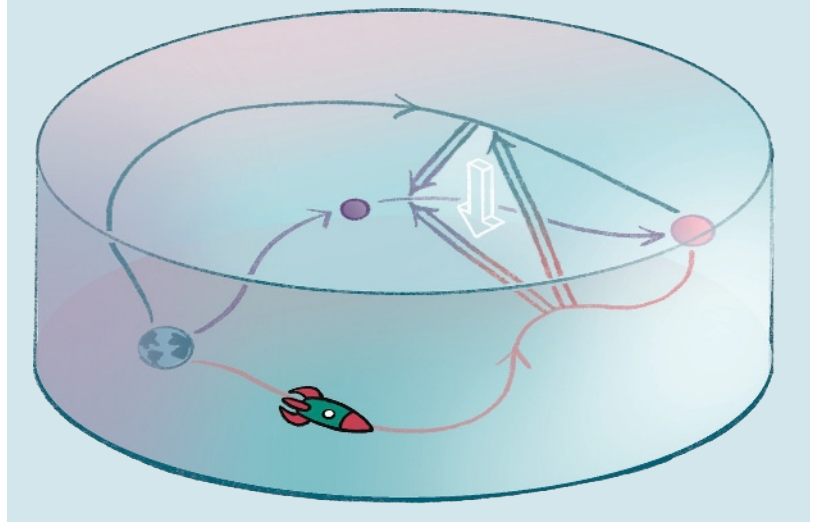
## DE NOUVELLES CONNEXIONS

Néanmoins, comme beaucoup d'autres, je vois les infini-catégories comme des constructions tout à fait novatrices permettant aux mathématiciens d'envisager de nouvelles connexions entre des objets ou des théorèmes qu'il aurait été, autrement, impossible d'énoncer ou de démontrer rigoureusement.

L'expérience historique suggère que les mathématiques les plus exotiques aujourd'hui finiront par être vues comme simples et par être enseignées à la plupart des futurs étudiants en mathématiques. En tant que chercheuse en théorie des infini-catégories, je trouve d'ailleurs amusant de spéculer sur la façon dont ce sujet pourrait être simplifié ou rendu plus intuitif.

Une possibilité est que l'on utilisera une ruse langagière, une version généralisée à l'extrême du «le» des catégories (cachant, en fait, un «un») qui pourrait rendre les infini-catégories aussi faciles à appréhender pour les étudiants de la fin du XXI<sup>e</sup> siècle que les catégories ordinaires le sont aujourd'hui. Rappelons que l'axiome clé dans une catégorie ordinaire est l'existence d'une transformation composée unique  $g \circ f: X \rightarrow Z$  pour toute paire de transformations composables  $f: X \rightarrow Y$  et  $g: Y \rightarrow Z$ . Cette

## L'INFINI-GROUPOÏDE FONDAMENTAL



composée est un élément dans l'espace de toutes les transformations allant de  $X$  à  $Z$ . De même, dans une infini-catégorie, il existe tout un espace des flèches menant de  $X$  à  $Z$  qui, dans le cas d'un infini-groupeïde fondamental, peut être vu, en quelque sorte, comme un «espace de chemins». L'analogue pertinent de l'unicité des composées dans les catégories ordinaires est l'axiome selon lequel, dans une infini-catégorie, l'espace formé de toutes les composées de  $f$  et  $g$  est contractile, ce qui signifie qu'on peut ramener continûment tous ses points sur une seule origine à la façon d'un «Big Bang inversé».

Notons que le caractère contractile de l'espace des composées n'implique pas qu'il existe une unique composée: par exemple, dans le cas d'un infini-groupeïde fondamental, il peut y en avoir un grand nombre. Mais le caractère contractile garantit que deux composées différentes soient homotopes, et que deux homotopies différentes reliant ces composées soient reliées par une homotopie supérieure, etc.



**Dans un espace contractile, on peut ramener tous les points sur une seule origine, à la façon d'un Big Bang inversé**





Dans un essai publié en 1974, le mathématicien britannique Michael Atiyah écrivait: «Le but des théories scientifiques est d'organiser méthodiquement l'expérience passée, de sorte que les générations suivantes, nos étudiants, leurs étudiants à eux, et ainsi de suite, soient en mesure d'en comprendre les aspects les plus essentiels de la façon la plus indolore possible, et c'est le seul moyen de poursuivre la construction cumulative de toute activité scientifique sans aboutir à une impasse.» La théorie des catégories joue sans aucun doute ce rôle dans les mathématiques modernes; si les mathématiques sont la science de l'analogie – l'étude des motifs qui se répètent –, alors la théorie des catégories est l'étude des modèles de pensée mathématique – les «mathématiques des mathématiques», pour reprendre les mots d'Eugenia Cheng.

## LES OUTILS DE DEMAIN

Si les chercheurs sont aujourd'hui capables de manipuler autant d'idées et de notions différentes, c'est parce que notre compréhension de nombreux concepts mathématiques a été simplifiée par l'abstraction. Cette dernière agit comme un processus consistant à prendre du

recul par rapport à chaque problème précis et à adopter une vision plus large des mathématiques. À de hauts niveaux d'abstraction, beaucoup de détails fins sont invisibles, mais, de façon remarquable, certains théorèmes d'algèbre, de théorie des ensembles, de topologie ou de géométrie algébrique sont parfois vrais pour une même raison plus fondamentale, et, lorsque c'est le cas, leurs preuves peuvent s'écrire dans le langage de la théorie des catégories.

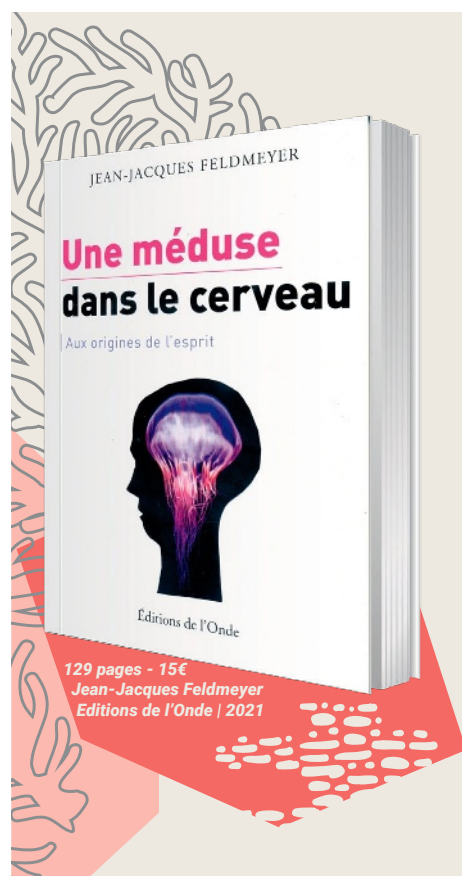
Qu'est-ce qui attend les mathématiciens du futur? Le consensus naissant, dans certains domaines des mathématiques, est que les objets mathématiques du XXI<sup>e</sup> siècle se définiront de façon plus naturelle dans le monde des infini-catégories, de la même manière que les catégories ordinaires sont un langage pertinent pour les objets mathématiques du XX<sup>e</sup> siècle. Certains mathématiciens nourrissent l'espoir que l'empilement vertigineux de flèches en toute dimension qui habite les infini-catégories sera relégué à l'arrière-plan dans l'inconscient collectif en mathématiques, chaque espace de choix contractile étant «vu» comme un seul point. Et on ne peut que s'interroger: si tant de progrès ont eu lieu au XX<sup>e</sup> siècle, où en seront les mathématiques à la fin du nôtre? ■

## BIBLIOGRAPHIE

E. Riehl et D. Verity, **Infinity category theory from scratch**, prépublication arXiv, 2016 (<https://arxiv.org/abs/1608.05314>).

E. Cheng, **Comment cuire un 9 ?**, Flammarion, 2016.

J. Baez, **An introduction to n-categories**, dans E. Moggi et G. Rosolini (éd.), *Category Theory and Computer Science*, Springer, 1997.



# Une méduse dans le cerveau

Aux origines de l'esprit

## Une approche nouvelle du cerveau

Les fonctions cérébrales, sous l'essor des neurosciences, apparaissent comme des mécanismes de plus en plus complexes. Pour autant, les fonctions dites «supérieures» telles que la conscience ou la créativité restent mystérieuses.

L'originalité de cet essai est de tenter une approche différente du système nerveux dans une perspective évolutive et d'esquisser l'origine biologique de l'esprit.

L'étude des méduses, par des zoologues au 19<sup>e</sup> siècle, a mené à la découverte d'une cellule prodigieuse -le neurone- apparue il y a plus de 600 millions d'années, à l'origine des multiples ébauches de cerveaux et de la diversité des consciences du monde animal.

Le neurone a été le moteur de l'évolution animale. Multipliant les liaisons sensorielles et motrices, il adaptait les mouvements de chaque espèce tout en dressant les cartes de l'environnement, des événements et de ses propres actions.

Son code ? L'ADN, vieux de 3,8 milliards d'années, aux origines de la vie, la vie elle-même.

**JEAN-JACQUES FELDMEYER**, médecin suisse spécialiste en neurologie, chef de clinique à l'Université de Lausanne puis établi à Delémont. Auteur de nombreuses publications en neurologie, engagé dans l'enseignement, la formation continue et la diffusion des idées dans le domaine des neurosciences, il a déjà publié «Cerveau et pensée - la conquête des neurosciences» (Georg 2002) et «Le cerveau-idées reçues» (Le Cavalier Bleu, 2007).



# À la recherche de la panthère

L'aventure du photographe Vincent Munier et de l'écrivain Sylvain Tesson, partis au Tibet sur les traces de la panthère des neiges, sort sur les écrans ce mois-ci. En voici quelques somptueuses images qui donnent une belle occasion de découvrir cette espèce méconnue, sujet de prédilection de la biologiste Justine Shanti Alexander, directrice du Snow Leopard Network.

**CÉCILE LESTIENNE**  
directrice de la rédaction de *Pour la Science*



# des neiges







## HISTOIRE D'UNE RENCONTRE

Un soir de printemps, le photographe animalier multiprimé et spécialiste de la faune des milieux extrêmes Vincent Munier (à gauche) propose à l'écrivain Sylvain Tesson (à droite) de l'emmener au Tibet, où il piste depuis plusieurs années un félin particulièrement insaisissable, la panthère des neiges (*Panthera uncia*). Difficile à observer, discret, rare et solitaire, l'once, de son nom vernaculaire, ou *saâ* en tibétain, vit dans les régions les plus reculées et les plus inaccessibles des montagnes d'Asie

centrale. Finir par le voir n'était donc pas un pari gagné d'avance. Pour maximiser les chances de rencontrer ce « fantôme des montagnes », le photographe propose de partir en février, car l'hiver est la saison des amours, le moment où mâles et femelles se déplacent pour se rencontrer. « Le moment idéal, explique Vincent Munier, pour chercher les traces, lire les indices, écouter les feulements et passer des journées entières les yeux rivés aux jumelles », même si en février la moyenne des températures dans la haute vallée du Mékong est de  $-18^{\circ}\text{C}$ , plutôt  $-25^{\circ}\text{C}$  le matin, voire parfois  $-35^{\circ}\text{C}$ ; même si on a le souffle court entre 4 000 et 5 000 mètres d'altitude alors qu'il faut porter eau, nourriture, tente, duvet... ainsi que le lourd matériel pour photographier. Et pour filmer, car les deux hommes sont accompagnés de la réalisatrice Marie Amiguet et de l'assistant-réalisateur Léo-Pol Jacquot. Magnifiques témoignages de cette rencontre entre l'humain et l'animal : le récit de leur quête, *La Panthère des neiges*, publié en 2019, qui a valu le prix Renaudot à Sylvain Tesson, et un documentaire du même nom qui sort au cinéma en cette fin d'année 2021.



© Toutes les photos sont de Vincent Munier/Kobaalann productions

## UNE AIGUILLE DANS UNE BOTTE DE FOIN

Du Pamir afghan au Tibet oriental et de l'Altai à l'Himalaya, l'aire de répartition de la panthère des neiges couvre 2 millions de kilomètres carrés, répartis sur 12 pays. « Sur cette zone grande comme le Mexique, on estime qu'il reste entre 4 000 et 7 000 individus seulement, indique Justine Shanti Alexander, biologiste de la conservation et spécialiste de cette espèce. Des études en cours devraient nous préciser d'ici à 2023 la taille de la population, mais la rareté, la faible densité (environ 1 individu pour 100 kilomètres carrés dans un habitat favorable), la topographie environnante et la morphologie de ces animaux rend le comptage particulièrement difficile. » Ce sont des félins de taille moyenne (entre 97 et 114 centimètres), dont la queue est parfois aussi longue que le corps ! Leur fourrure épaisse, gris fumé, est ornée de rosettes ouvertes gris foncé.

En montagne, ils se fondent parfaitement dans les pentes rocheuses, ce qui les rend pratiquement invisibles. La preuve s'il en faut : sur la photo ci-dessus prise lors d'un précédent voyage, discernerez-vous la tête du félin se profiler derrière le rocher à gauche ? Vincent Munier, qui a pourtant l'œil exercé, ne l'a remarquée que plusieurs semaines après son retour en triant les images ! Focalisé sur l'oiseau, il n'avait tout simplement pas vu l'once qui l'observait.









### UN LONG FESTIN

La panthère va mettre plusieurs jours à dévorer ce petit yack tombé sous ses crocs, le disputant parfois aux vautours. La chasse étant difficile, c'est un enjeu pour ces félins de préserver leur proie des concurrents et autres charognards. « C'est particulièrement vrai pour les femelles qui viennent d'avoir des petits : il leur faut souvent parcourir une longue distance entre leur "dîner de la semaine" et la grotte où elles laissent leur progéniture », précise Justine Alexander. Le jeune ruminant appartenait à un troupeau de yacks domestiques. « Les Tibétains acceptent facilement que le fantôme des montagnes prélève un membre de leur cheptel, assure Vincent Munier. Pour eux, il s'agit d'un tribut à la Nature. » Par ailleurs, les monastères bouddhistes, qui professent l'amour, le respect et la compassion pour tous les êtres vivants, jouent un rôle certain dans la protection du félin.



### MENU CARNIVORE

Le bharal (*Pseudois nayaur*) autrement appelé « mouton bleu » (voir ci-dessous), est l'une des proies préférées de la panthère des neiges, qui se nourrit également d'ibex (*Capra siberica*) et d'argalis (*Ovis ammon*). Le félin ne dédaigne pas non plus marmottes, lièvres et même certains oiseaux. Sans compter que l'once peut s'attaquer également aux chèvres, moutons et yacks domestiques quand l'occasion se présente.

### LA DURE VIE D'UN CHASSEUR

Grâce à sa longue queue qui lui assure l'équilibre, ses longues pattes arrière qui lui permettent de sauter haut et loin, ses larges pattes avant efficaces pour marcher dans la neige, et sa stature relativement petite (les femelles pèsent de 30 à 41 kilos, les mâles entre 34 et 47 kilos, le record connu étant de 52 kilos), l'once dévale les pentes escarpées lorsqu'il part en chasse. Sa technique ? Sauter au garrot de sa proie et ne plus la lâcher, quitte à tomber et à rouler le long du versant arrimé à sa victime, se heurtant et rebondissant entre les rochers. Jusqu'à, parfois, se briser l'échine. « L'espérance de vie moyenne de ce félin dans les parcs zoologiques ne dépasse pas quinze ans. Certainement moins dans la nature, commente Justine Alexander. Les deux plus vieilles panthères des neiges que nous observons au sein du Snow Leopard Network et dont nous connaissons avec certitude la date de naissance sont deux femelles âgées aujourd'hui de 12 ans. »











## UN GRAND ROYAUME

« On a longtemps cru que le domaine vital d'une panthère des neiges avoisinait 20 kilomètres carrés. Grâce aux nouveaux dispositifs de suivi dotés d'un système de géolocalisation, les chercheurs se sont aperçus que le territoire d'un mâle approchait plutôt 220 km<sup>2</sup>, et celui d'une femelle 130 km<sup>2</sup>. » Solitaires et territoriaux, les onces peuvent se battre jusqu'à la mort pour défendre leur domaine. Les femelles y élèvent leurs petits (de un à trois par portée) jusqu'à leur deuxième hiver, vers 20-22 mois.



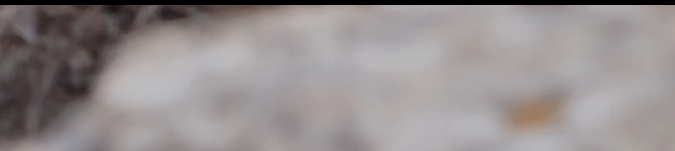




CAMERA TRAP - CANYON

06:44 PM

-26°C / -15°F



## CAMÉRA CACHÉE

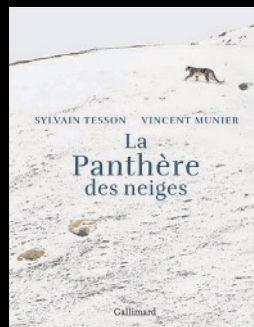
Vincent Munier installe une de ses caméras-pièges. Par ce passage, la panthère pourrait bien se glisser, pense-t-il. Avec raison, comme le montre cette photo (à droite) prise par l'appareil. Le même type de matériel est utilisé par les scientifiques pour traquer le félin, à raison de 40 caméras (environ 450 euros pièce...) pour au moins 1.000 kilomètres carrés lors des campagnes d'observation. Les chercheurs reconnaissent chaque individu grâce au motif unique de ses taches... Encore faut-il le distinguer quand la luminosité est faible, quand l'angle de vue est mauvais et quand les longs poils de l'once, en ondulant, brouillent le dessin du pelage.

## PÉRILS EN SÉRIE

Classée en 1972 par l'Union internationale pour la conservation de la nature parmi les espèces menacées, la panthère des neiges est considérée en voie d'extinction par l'Appendice 1 de la Cites (Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages). Aujourd'hui, 14% seulement de son territoire est en zone protégée et nombreux sont les périls que l'once rencontre: l'empiètement sournois du développement humain (routes, clôtures, industrie minière et hydraulique...), qui morcelle son territoire alors qu'il a besoin de grands espaces pour vivre; l'accroissement des populations humaines et des troupeaux domestiques, qui entraînent surpâturage et déprédation du bétail sur son habitat déjà fragile; les chiens errants, notamment au Ladakh. Et bien entendu le changement climatique. «En Mongolie, précise Justine Alexander, la panthère des neiges affronte des températures qui s'étalent

de -40 °C à +40 °C... Reste que le dernier rapport du Giec prévoit une augmentation des températures particulièrement forte et rapide en Asie centrale et que l'on ne sait pas comment va s'adapter l'once, ni quelles seront les modifications de la végétation et les répercussions sur ses proies. Ni évidemment quelles seront les réactions des populations humaines face à tous ces changements. Et l'une des clés de la préservation de la panthère des neiges est bien la possibilité d'une cohabitation pacifique avec les humains.» De son côté, Vincent Munier souhaite partager à travers son film ses émotions et sa fascination pour la panthère des neiges et plus largement pour le monde vivant, «sensibiliser les jeunes et les moins jeunes aux impératifs de sa préservation; donner envie aux gens tout simplement de se poser dans la nature, de prendre une paire de jumelles et d'observer les êtres qui les entourent.»

## POUR EN SAVOIR PLUS



**La Panthère des neiges**, S. Tesson (texte) et V. Munier (photos), Gallimard, 2021.



**La Panthère des neiges**, documentaire de Marie Amiguet et Vincent Munier, en salles le 15 décembre.



**Site du Snow Leopard Network**, dirigé par la biologiste de la conservation Justine Shanti Alexander : [snowleopardnetwork.org/](http://snowleopardnetwork.org/)



## L'ESSENTIEL

> L'approche dite « biopsie liquide » consiste à analyser dans le sang des patients atteints de cancer les cellules tumorales circulantes et d'autres éléments liés aux tumeurs.

> Sur le plan fondamental, de telles analyses permettent d'étudier l'évolution d'un cancer et les mécanismes par lesquels des métastases se forment.

> Sur le plan clinique, la biopsie liquide permet de faire des diagnostics précoces, de suivre l'évolution de la maladie chez le patient, d'éclairer les choix thérapeutiques possibles...

> Un gros effort de standardisation reste cependant à faire pour que la biopsie liquide s'impose dans la pratique clinique.

## LES AUTEURS



**CATHERINE ALIX-PANABIÈRES**  
maîtresse de conférences, praticienne hospitalière et directrice du Laboratoire des cellules circulantes rares humaines (LCCRH) au CHU et à l'université de Montpellier

# Décrypter le cancer avec des prises de sang

En analysant les cellules tumorales qui circulent dans le sang d'un malade atteint de cancer, on peut mieux caractériser la maladie et évaluer sa progression. Et choisir le traitement le plus adapté.

**E**n 2020, les cancers ont causé le décès d'environ 10 millions de personnes dans le monde et, d'ici à 2030, on peut s'attendre à plus de 26 millions de nouveaux cas et 17 millions de décès. Ces pathologies, qui correspondent à la prolifération anarchique des cellules dans un tissu ou dans un organe, sont combattues avec des diagnostics de plus en plus précoces et des traitements de plus en plus performants. Cependant, s'il apparaît des métastases, c'est-à-dire des tumeurs secondaires ayant essaimé à partir d'une tumeur primaire, la maladie est souvent incurable. En conséquence, plus de 99% des décès liés à un cancer ne sont pas dus à la tumeur primaire, mais aux métastases.

Ainsi, la connaissance des différentes étapes qui conduisent des cellules de la tumeur primaire à se détacher et à coloniser d'autres organes est cruciale pour mieux comprendre la dissémination de la maladie cancéreuse et identifier les éventuelles cibles thérapeutiques. Comment étudier ce processus de dissémination? Depuis maintenant près d'une vingtaine d'années, chercheurs et cliniciens développent une nouvelle approche qui consiste à détecter dans le sang des malades la présence de cellules, d'ADN ou d'autres éléments originaires des tumeurs.

© Science Photo Library/Dennis Kunkel Microscopy





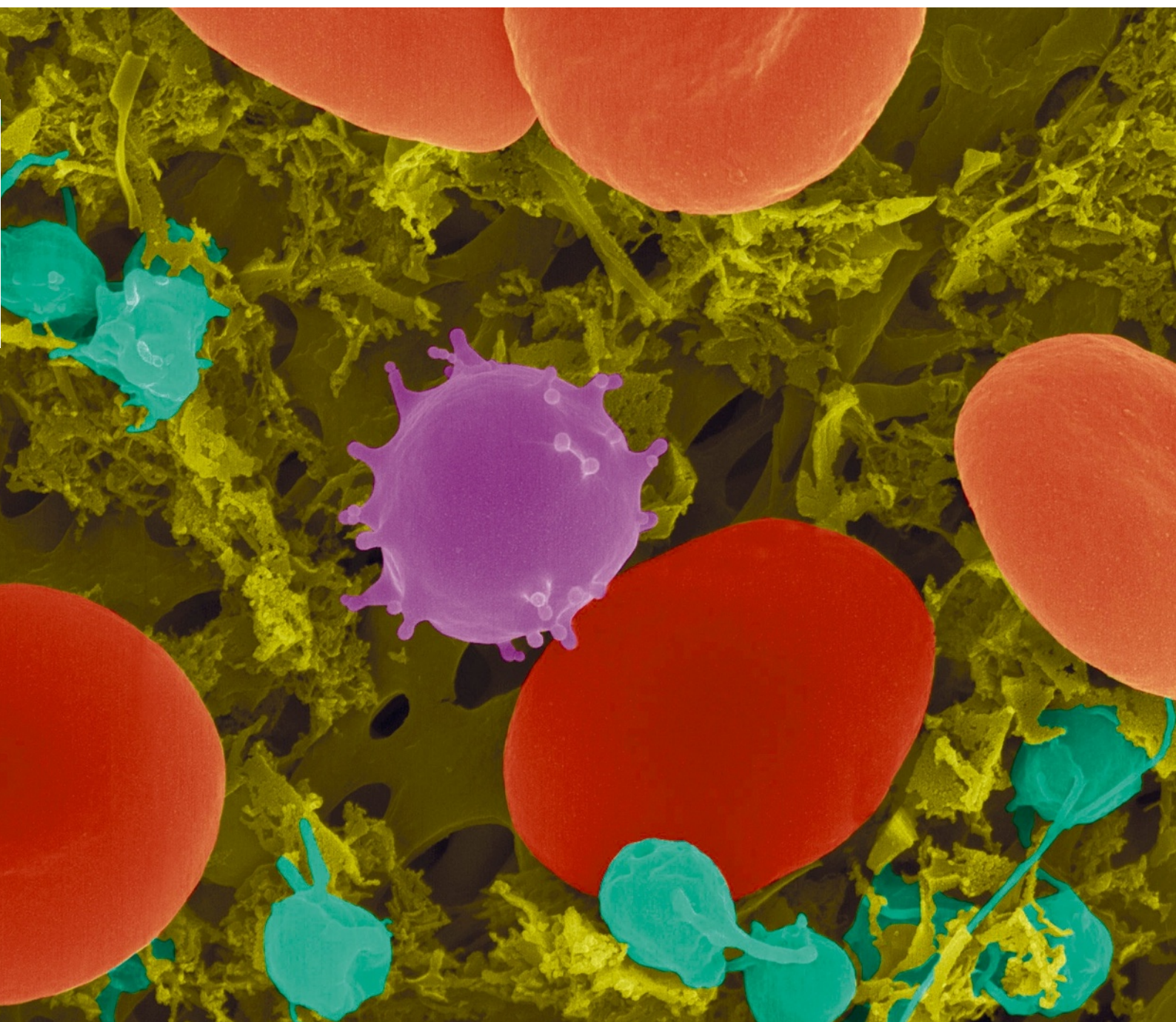


**OLIVIER PANABIÈRES**  
biologiste médical  
au laboratoire  
d'analyses médicales  
Biomer, à Metz



**CHRISTIAN SIATKA**  
généticien et toxicologue  
au sein de l'équipe  
Chrome de l'université  
de Nîmes et à l'École  
de l'ADN de Nîmes

Cette image de microscopie électronique montre (en fausses couleurs) divers éléments circulant à l'intérieur d'un vaisseau sanguin : des globules rouges, un lymphocyte (en violet), des plaquettes (en vert)... Dans le sang d'une personne souffrant de cancer, on trouve aussi quelques cellules qui se sont détachées de la tumeur, ainsi que de l'ADN issu de celle-ci. Leur détection et leur analyse constituent une « biopsie liquide » de plus en plus utile en cancérologie fondamentale et clinique.



Avant de décrire ces développements, rappelez quelques connaissances de base sur les tumeurs cancéreuses et leurs métastases.

La plupart des cancers impliquent des tumeurs solides, c'est-à-dire des amas de cellules localisés dans un tissu ou un organe tels que le sein, la prostate, le colon, le poumon... L'apparition *in situ* de nouveaux vaisseaux sanguins favorise la croissance de la tumeur primaire. Puis certaines cellules, plus agressives que les autres, se décrochent de la tumeur par divers mécanismes (diminution de l'expression de protéines d'adhésion, sécrétion d'enzymes lytiques...). Devenues mobiles et invasives, ces cellules gagnent la circulation sanguine ou lymphatique, de façon isolée ou en petits groupes, atteignent des organes distants (la moelle osseuse, le foie, les poumons, le cerveau...) et y constituent de nouveaux foyers ou micrométastases. Ces «cellules tumorales circulantes», ou CTC, deviennent ainsi des «cellules tumorales disséminées» (CTD). Elles s'épanouissent dans leurs nouveaux environnements et peuvent rester dans un état de dormance durant de nombreuses années, bien après l'élimination chirurgicale de la tumeur primaire.

## QUAND LA TUMEUR ESSAIME

Parfois, à la faveur d'événements non totalement élucidés, les CTD se développent sur place et donnent lieu à des métastases macroscopiques. Mais les CTD peuvent aussi circuler de nouveau sous la forme de CTC, essaimer, coloniser d'autres organes et être à l'origine de métastases secondaires, voire retourner sur le site de la tumeur primaire et engendrer des clones métastatiques agressifs.

Dans différents types de cancers, la moelle osseuse apparaît comme un organe de prédilection pour les CTD, c'est-à-dire un «réservoir-étape» avant une nouvelle colonisation d'organes distants. Aussi, dans le passé, pour comprendre les mécanismes biologiques régulant les CTD, les cancérologues effectuaient des prélèvements de moelle osseuse. Or il s'agit là d'actes invasifs. Aujourd'hui, la détection de CTC dans le sang se révèle plus pertinente, non seulement pour étudier et évaluer la progression tumorale, mais aussi parce qu'elle est prometteuse en termes de pronostic et de suivi thérapeutique.

Cette nouvelle approche, assimilable à une «biopsie liquide», expression introduite en 2010 par Catherine Alix-Panabières (l'une d'entre nous) et son collaborateur Klaus Pantel, du CHU de Hambourg, en Allemagne, se définit donc comme un test sanguin non invasif, très sensible, réalisable facilement et de manière répétée. Surtout, elle permet d'analyser à n'importe quel moment des CTC issues de la tumeur primaire ou des métastases. La définition de la biopsie liquide s'élargit de nos jours à l'analyse de l'ADN tumoral circulant

(ADNtc), des vésicules extracellulaires (exosomes), des microARN circulants et des plaquettes, sans oublier le microenvironnement circulant que constituent les cellules du système immunitaire du patient.

Plus précisément, à partir d'un simple prélèvement sanguin, on peut séparer les cellules sanguines et les CTC du plasma, le composant liquide du sang. Et dans ce dernier, il est possible de détecter l'ADN tumoral circulant provenant de cellules tumorales mortes. On dispose en effet aujourd'hui de méthodes ultrasensibles pour détecter, dans un «océan» d'ADN circulant normal, des quantités infimes d'ADNtc, et l'on est aussi capable d'identifier des mutations et autres changements dans ce dernier. Cela permet de détecter précocement un cancer ou une récurrence.

En 2020, Rossa Chiu, de l'université chinoise de Hong Kong, et ses collègues ont mis en avant une nouvelle approche pour étudier l'ADNtc, la «fragmentomique». Lors de l'apoptose (phénomène naturel de mort cellulaire programmée) de cellules, l'ADN est dégradé en de nombreux fragments et se retrouve dans le sang. L'ensemble de ces fragments constitue une véritable signature du tissu d'origine et devrait aider à mieux comprendre la biologie de l'ADN circulant, dont résulteront probablement des applications cliniques.

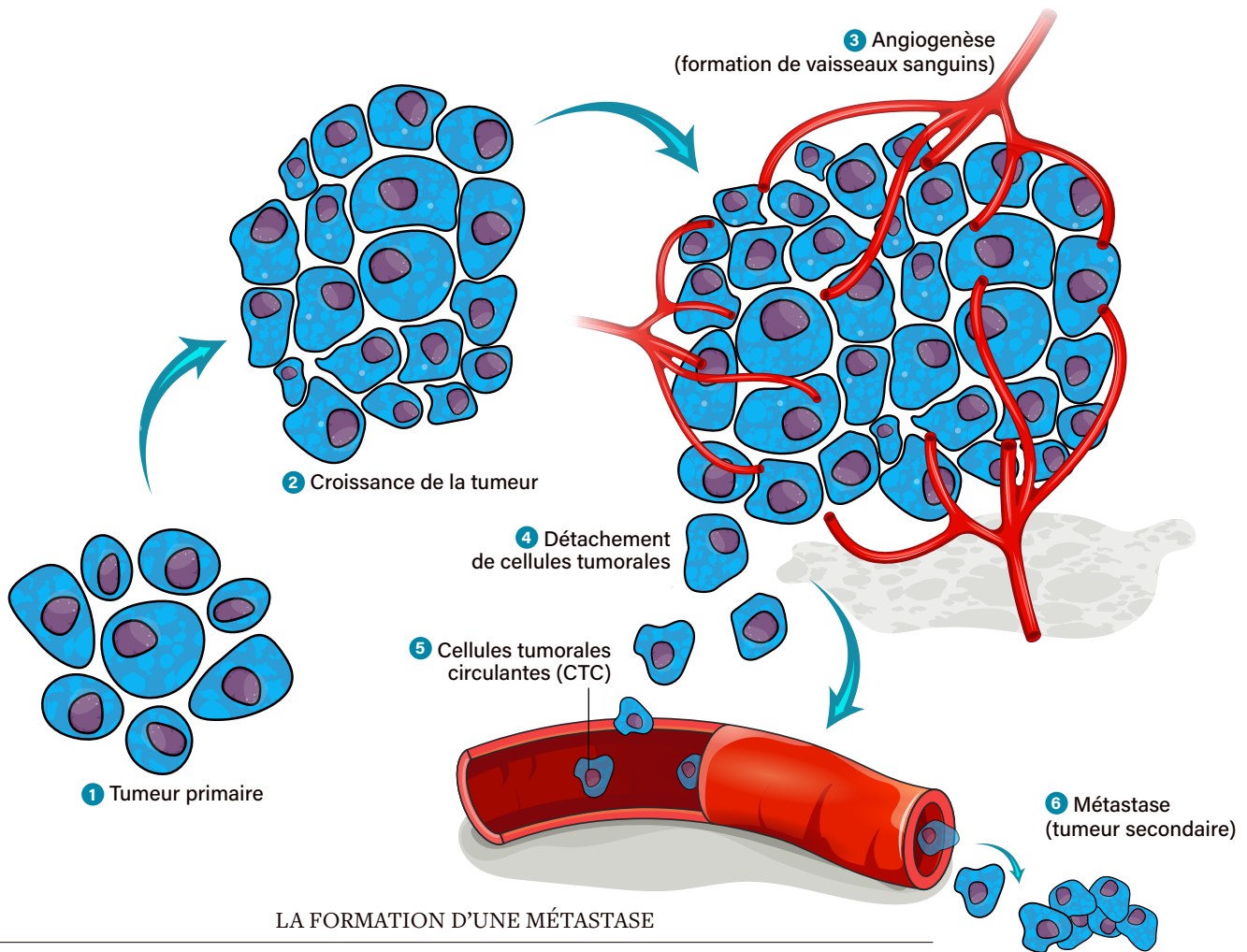
Venons-en maintenant aux cellules tumorales circulantes. Dans le sang des patients atteints d'un cancer, les CTC se trouvent à des concentrations infimes: 1 à 10 cellules dans



# Dans 7,5 millilitres de sang, on trouve moins de 10 cellules tumorales circulantes

7,5 millilitres de sang. Pour les détecter et les isoler, une étape d'enrichissement est donc indispensable. Elle fait appel à un large éventail de techniques, fondées à la fois sur des propriétés physiques (taille, densité, charge électrique, déformabilité) et biologiques (expression de protéines de surface, viabilité). Après cette étape d'enrichissement, il reste encore, dans l'échantillon obtenu, un nombre considérable





#### LA FORMATION D'UNE MÉTASTASE

Un cancer affectant un organe solide débute par la transformation, dans ou sur cet organe, de cellules qui se mettent à proliférer de façon non contrôlée : c'est la tumeur primaire **1**. Cette tumeur grossit **2** et s'implante durablement grâce à la formation de nouveaux vaisseaux sanguins, qui l'alimentent en oxygène et en nutriments **3**. Quelques cellules peuvent se détacher de la tumeur primaire **4** et gagner la circulation sanguine **5**. Parvenues à un autre endroit de l'organisme où elles rencontrent des conditions propices, ces cellules se fixent et donnent naissance à une tumeur secondaire, ou métastase **6**. Cette métastase peut à son tour libérer des cellules tumorales qui vont circuler et essaimer.

de cellules sanguines. Il faut donc distinguer de façon univoque les CTC de ces dernières.

Les deux grandes stratégies pour la mise en évidence des CTC se fondent sur la détection de protéines ou d'ARN messagers (ARNm) spécifiques de ces cellules. Actuellement, la seule technique de détection des CTC homologuée par la FDA (Food and Drug Administration, l'autorité aux États-Unis en matière d'aliments et de médicaments), est la technique CellSearch, commercialisée par la société italienne Menarini Silicon Biosystems. Elle consiste à extraire les CTC *via* le marqueur membranaire épithélial EpCAM (pour « molécule d'adhésion cellulaire épithéliale ») à l'aide d'anticorps spécifiques, puis à les marquer de façon que l'on puisse visualiser ces cellules par fluorescence.

Le Laboratoire des cellules circulantes rares humaines (LCCRH), que dirige Catherine Alix-Panabières, utilise ainsi quotidiennement deux systèmes CellSearch. Par ailleurs, depuis 2002, ce laboratoire utilise aussi un test fonctionnel (nommé Epispot) *in vitro* qui permet de détecter uniquement les CTC vivantes. Actuellement, cette technique de pointe s'oriente vers le

concept de détection de cellules uniques, en collaboration avec l'ESPCI (École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris). Ainsi, l'Episdrop (pour *Epispot in a drop*, « Epispot dans une goutte ») permettra de détecter les CTC fonctionnelles une par une, dans des microgouttelettes. À l'avenir, grâce à cette technique innovante, on devrait être en mesure d'évaluer rapidement l'impact de médicaments sur ces cellules et ainsi d'établir leur profil de sensibilité à un médicament donné.

#### IDENTIFIER LES CELLULES SOUCHES CANCÉREUSES

Depuis des années, de nombreuses équipes de recherche s'efforcent de développer des protocoles pour cultiver *in vitro* des CTC provenant de patients souffrant d'un cancer solide à un stade avancé (cancers du sein, de la prostate, du poumon, du côlon...). L'objectif est notamment d'identifier la sous-population de CTC les plus agressives, capables de se renouveler et à l'origine des métastases chez le patient. Les cellules de cette sous-population sont appelées « cellules souches

cancéreuses» ou «cellules initiatrices de tumeurs». Cette identification reste un vrai défi technologique et biologique.

Pour le relever, les chercheurs ont par exemple besoin d'établir des lignées cellulaires *in vitro* en cultivant des CTC dans un milieu nutritif approprié, ou d'inoculer des CTC chez des souris immunodéficientes afin de créer une tumeur cancéreuse humaine chez l'animal.

En 2013, le LCCRH a ainsi obtenu, pour la première fois, neuf lignées stables de CTC coliques à partir d'un prélèvement sanguin chez un patient atteint de cancer métastatique du côlon. Ces cellules montrent un profil d'expression des gènes propre aux CTC et bien distinct de celui des cellules coliques des tumeurs primaires ou secondaires. Le LCCRH possède ainsi un matériel unique au niveau mondial: des clones de CTC capables de produire des métastases.

Ici, l'idée directrice est de mieux comprendre le fonctionnement intime (des voies de signalisation spécifiques) de ces cellules. Les travaux en cours de plusieurs membres du LCCRH, dont Laure Cayrefourcq et Catherine Alix-Panabières, en collaboration avec Klaus Pantel et d'autres chercheurs du CHU de Hambourg, s'inscrivent dans cet axe. À terme, ces études aideront à la mise au point de médicaments capables d'éliminer ces cellules à l'origine de métastases.

Les cellules souches cancéreuses sont aussi le siège d'un processus complexe, la transition épithélio-mésenchymateuse, au cours de laquelle les cellules perdent une grande partie de leurs caractéristiques épithéliales pour acquérir des propriétés de cellules mésenchymateuses (un épithélium est un tissu constitué de cellules étroitement juxtaposées et jointives qui recouvre un organe, il repose sur une membrane basale).

En effet, au cours de l'évolution d'une tumeur, les cellules épithéliales tumorales peuvent se différencier, se modifier morphologiquement et moléculairement afin d'acquérir des caractéristiques de cellules mésenchymateuses, à savoir une mobilité plus importante pour migrer vers des organes distants. Le processus inverse, la transition mésenchymato-épithéliale, semble jouer un rôle fondamental dans la formation des métastases, lorsque les CTC atteignent un microenvironnement propice à leur implantation. Toutefois, très peu de données existent sur les mécanismes qui contrôlent la balance exacte entre la transition épithélio-mésenchymateuse et son processus inverse durant la cascade métastatique.

## UNE RÉVOLUTION DANS LA PRISE EN CHARGE DES CANCERS

L'étude des CTC revêt ainsi une grande importance en cancérologie fondamentale, pour comprendre comment les métastases se

## LES APPLICATIONS CLINIQUES DE LA BIOPSIE LIQUIDE

Pour la médecine, l'étude des cellules tumorales circulantes (CTC) et de l'ADN tumoral circulant (ADNtc) présente de l'intérêt dans divers contextes. Les applications les plus importantes sont résumées ici.

### Dépister précocement un cancer

Dépister un cancer à un stade où les chances de guérison sont les plus grandes reste un espoir pour les chercheurs et les cliniciens. La biopsie liquide pourrait relever le défi en termes de spécificité et de sensibilité, mais un énorme travail de validation de méthodes incluant les réalités cliniques reste à faire. L'écueil à éviter ici est le surdiagnostic par l'établissement de profils trop stéréotypés de biomarqueurs.

### Définir le stade du cancer

Le stade du cancer est défini suivant une classification stricte fondée sur la taille et la différenciation de la tumeur primaire, ainsi que sur la présence de cellules tumorales dans les ganglions proches ou, pour la présence de métastases, dans les organes distants de la tumeur primaire. La mesure des CTC et de l'ADNtc offre aujourd'hui une occasion de redéfinir les systèmes actuels de classification des tumeurs, ce qui permettrait de mieux discriminer les patients en fonction du risque que leur maladie progresse.

### Détecter précocement

#### les rechutes métastatiques

Après une classification initiale de la pathologie et les premiers traitements, les analyses de CTC et d'ADNtc peuvent aider à suivre individuellement et en temps réel des malades. À titre d'exemple, au-delà du dosage de l'antigène PSA pour le suivi d'un cancer de la prostate, il n'existe aujourd'hui aucun test sanguin qui soit suffisamment sensible et spécifique pour détecter une rechute précoce. Or des études récentes sur le suivi des patients comportant des analyses de CTC et l'ADNtc ont montré des résultats très encourageants, qui suggèrent que la détection précoce des rechutes est possible. Des données similaires ont été rapportées dans le cancer du sein.

### Suivre les patients ayant un cancer avancé et évaluer l'efficacité des traitements

Chez des patients ayant un cancer avancé du sein ou de la prostate, il a été montré que la détection séquentielle des CTC (dans un contexte de thérapies

systemiques) donnait une information pronostique précoce et fiable. En particulier, l'élimination des CTC ou de l'ADNtc durant le traitement pourrait, dans un futur proche, devenir un biomarqueur compagnon pour les études cliniques qui testent de nouveaux médicaments.

### Identifier des cibles thérapeutiques et des mécanismes de résistance

Actuellement, les traitements sont donnés très rapidement après le diagnostic initial en se fondant principalement sur l'analyse de la tumeur primaire éliminée par chirurgie. Cependant, les traitements exercent une pression de sélection sur les cellules tumorales, ce qui fait évoluer celles-ci, d'où la nécessité de nouvelles analyses ou reclassifications des lésions. Suivre l'évolution tumorale au cours du temps au moyen de biopsies répétées chez chaque patient est impossible en pratique. L'analyse des CTC et de l'ADNtc pourrait, elle, remplir ce rôle et permettrait d'identifier en temps réel des cibles thérapeutiques et des mécanismes de résistance chez des patients atteints d'un cancer avancé.



forment. Cependant, il existe aussi des enjeux plus concrets sur le plan médical. Le concept de biopsie liquide pourrait en effet apporter une révolution dans la prise en charge des cancers, comme l'illustrent plusieurs travaux récents portant sur le cancer du sein ou celui de la prostate.

Le choix des thérapies ciblées pour un patient donné est aujourd'hui établi après analyse de la tumeur primaire (on examine l'expression ou le statut génomique de cibles moléculaires spécifiques). Or de nombreuses études montrent que les cellules métastatiques ont des caractéristiques phénotypiques et génotypiques distinctes de celles de la majeure partie de la tumeur primaire. Une analyse directe des CTC apporterait donc des informations supplémentaires utiles pour éviter aux patients des traitements inadaptés, coûteux et aux effets secondaires délétères.

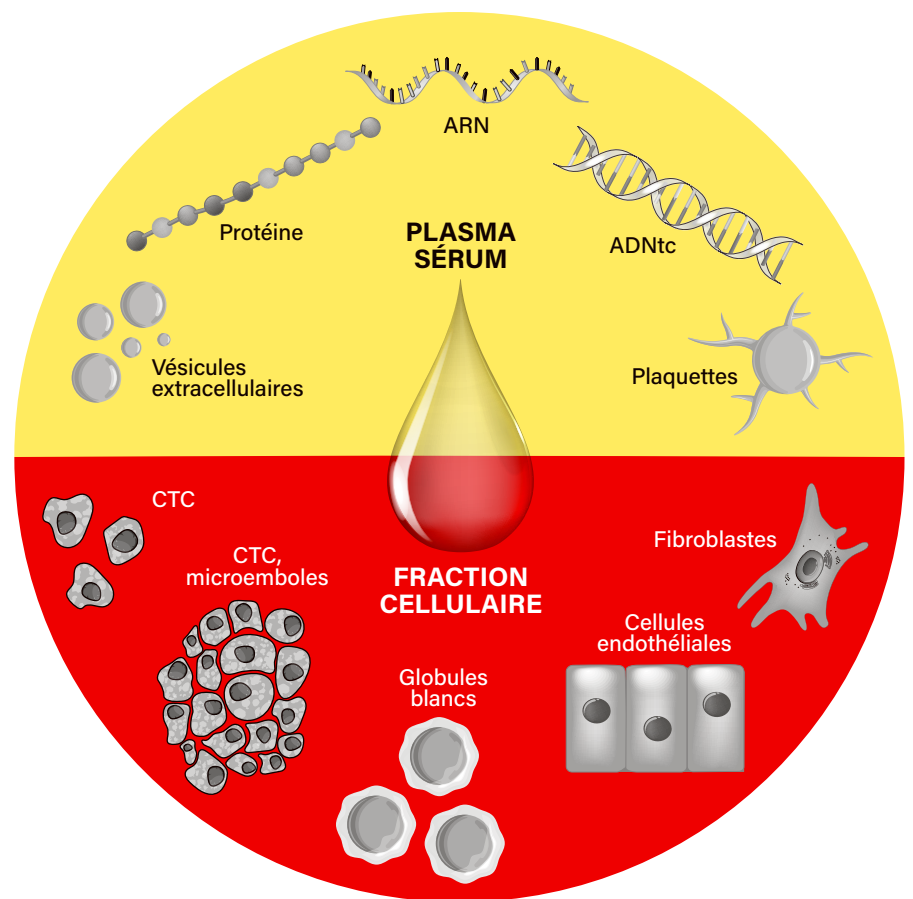
Dans la prise en charge du cancer du sein et de celui de la prostate, la biopsie liquide permet déjà d'identifier des cibles thérapeutiques ou des mécanismes de résistance aux traitements administrés. Passons en revue quelques exemples.

## SUREXPRESSON DU GÈNE *HER2* ET CANCER DU SEIN

Dans environ 20% des cas de cancer du sein, il y a surexpression du gène *HER2*, ce qui est associé à une agressivité et un potentiel métastatique plus importants. On peut traiter ces cancers par le trastuzumab, un anticorps monoclonal anti-*HER2* (c'est-à-dire dirigé contre la protéine *HER2* codée par le gène). Or un nombre important de données indiquent que chez une même patiente présentant un cancer du sein métastatique, il y a, pour ce qui est de l'amplification du gène *HER2*, contradiction entre le statut de la tumeur primaire et celui des CTC. Ainsi, une patiente considérée comme *HER2*<sup>(-)</sup> (c'est-à-dire chez qui l'expression de *HER2* est normale) d'après la seule analyse de la tumeur primaire peut présenter des CTC où le gène *HER2* est surexprimé, c'est-à-dire des CTC *HER2*<sup>(+)</sup>. Les thérapies choisies sur la base du profil *HER2*<sup>(-)</sup> risquent donc de laisser échapper, chez une telle patiente, des cellules tumorales métastatiques.

Aussi, deux essais cliniques portent actuellement sur l'utilisation, en cas de détection de CTC *HER2*<sup>(+)</sup>, de traitements ciblés anti-*HER2* seuls ou associés à une chimiothérapie. Il s'agit de l'étude allemande de phase 3 Detect III, coordonnée par Wolfgang Jani, de l'université d'Ulm, et de l'étude française CirCé T-DM1, coordonnée par François-Clément Bidard et Jean-Yves Pierga, de l'institut Curie, à Paris.

On a une situation analogue dans le cas des cancers du sein hormono-dépendants. Dans une étude publiée en 2013, Klaus Pantel et ses



Ce schéma illustre le contenu d'une goutte de sang, en distinguant sa fraction liquide (plasma ou sérum) de sa fraction cellulaire, c'est-à-dire des diverses cellules que l'on peut y trouver. Lorsque le patient est atteint d'une tumeur, le sang peut contenir, à de très faibles concentrations, des cellules tumorales qui se sont détachées (CTC), voire de petits amas de telles cellules ou microembolus. Dans la fraction sanguine liquide, on détecte également, en quantités infimes, de l'ADN provenant de la tumeur : l'ADN tumoral circulant (ADNtc).

collègues ont examiné l'expression des récepteurs aux œstrogènes (hormones féminines) par les CTC dans une cohorte de patientes atteintes d'un cancer du sein métastatique et où la tumeur primaire est positive pour le récepteur aux œstrogènes. Chez ces patientes, on retrouvait fréquemment des CTC n'exprimant pas ce récepteur. Ce passage d'un statut positif (de la tumeur primaire) à un statut négatif (des CTC) pour ce récepteur aux œstrogènes pourrait être un mécanisme d'échappement à l'hormonothérapie et favoriser le développement de métastases chez ces femmes. Dans ce cas, la biopsie liquide peut révéler un virage vers la résistance aux hormonothérapies.

## EXPRESSION OU NON DE LA PROTÉINE PD-L1

Un troisième exemple concerne une protéine notée PD-L1 et son interaction avec le système immunitaire. Ce système, qui a pour rôle de protéger l'organisme, est composé d'un ensemble complexe de cellules, de tissus et d'organes. Ainsi, les cellules cancéreuses, considérées comme des cellules anormales, vont être la cible du système immunitaire avant qu'elles n'affectent totalement l'organisme. Les cellules tumorales y échappent parfois de diverses façons : elles peuvent se recouvrir de plaquettes sanguines et ainsi devenir indétectables par les cellules tueuses du système immunitaire, elles peuvent exprimer à leur

surface des protéines qui les protègent de la phagocytose par les macrophages ou qui agissent sur les lymphocytes T...

Notamment, les cellules tumorales peuvent échapper à l'attaque des lymphocytes T en exprimant à leur surface la protéine PD-L1. Cette dernière inactive les lymphocytes T avant leur attaque en se liant à des récepteurs notés PD-1 et portés par la membrane de ces cellules immunitaires. Cette liaison PD-L1/PD-1, qui conduit à l'inactivation des lymphocytes T, constitue ainsi une cible thérapeutique: le blocage (par immunothérapie) de l'interaction PD-L1/PD-1 empêcherait les cellules cancéreuses d'inactiver les lymphocytes T et ces derniers recouvriraient alors leur capacité à détruire les cellules cancéreuses.

Pour la première fois, en 2015, l'analyse de CTC positives pour l'expression de PD-L1 a été réalisée par le groupe de Catherine Alix-Panabières sur une cohorte de 16 patientes atteintes d'un cancer du sein métastatique, grâce au système CellSearch. La majorité de ces patientes présentaient des sous-populations de CTC positives pour PD-L1, cellules qui avaient donc un potentiel élevé d'échapper à l'action des lymphocytes T. Cependant, d'autres spécialistes, comme l'équipe de Raza Ali, à l'université de Cambridge, ont montré que la protéine PD-L1 est rarement exprimée dans les tumeurs primaires de patientes souffrant de ce même type de cancer.

Cette différence peut s'expliquer de deux façons. Soit les cellules tumorales PD-L1<sup>(+)</sup> préexistaient dans la tumeur primaire, mais n'ont pas été détectées par les techniques usuelles de biopsie tissulaire, car trop peu nombreuses. Soit l'acquisition de l'expression de PD-L1 pourrait s'être faite lors de la dissémination des cellules tumorales de la tumeur primaire ou des métastases dans le sang.

En 2020, avec leurs collègues, William Jacot, de l'Institut du cancer de Montpellier (ICM), et Catherine Alix-Panabières ont montré que la présence de CTC positives pour PD-L1 dans le sang des patientes atteintes d'un cancer du sein était, statistiquement, corrélée à une moindre survie de celles-ci. Or cette corrélation n'existe pas dans le cas de l'expression de PD-L1 au sein de la tumeur primaire uniquement. En 2021, des travaux similaires ont été menés sur le cancer du poumon avec des résultats eux aussi très encourageants dans le contexte des immunothérapies.

En conclusion, la détection des CTC exprimant la protéine PD-L1 permettra de mieux comprendre la stratégie d'échappement au système immunitaire déployée par les cellules tumorales, de sélectionner au mieux les patients candidats à l'immunothérapie, de récolter des informations pronostiques mais

aussi de développer de nouvelles thérapies ciblées sur ce marqueur.

Dans le cas du cancer de la prostate, l'équipe d'Emmanuel Antonarakis, du centre Sidney Kimmel pour le cancer, à Baltimore, et celle de Howard Scher, du Memorial Sloan Kettering Cancer Center, à New York, s'intéressent depuis une dizaine d'années à l'expression par les CTC de variants d'épissage (variants dus à des modifications de l'ARN transcrit à partir de l'ADN) des récepteurs des androgènes. Ces variants représentent l'une des causes potentielles de résistance aux traitements (l'enzalutamide et l'abiratéron) qui ciblent ces récepteurs hormonaux.

## DES BIOMARQUEURS DE RÉSISTANCE AU TRAITEMENT DU CANCER DE LA PROSTATE

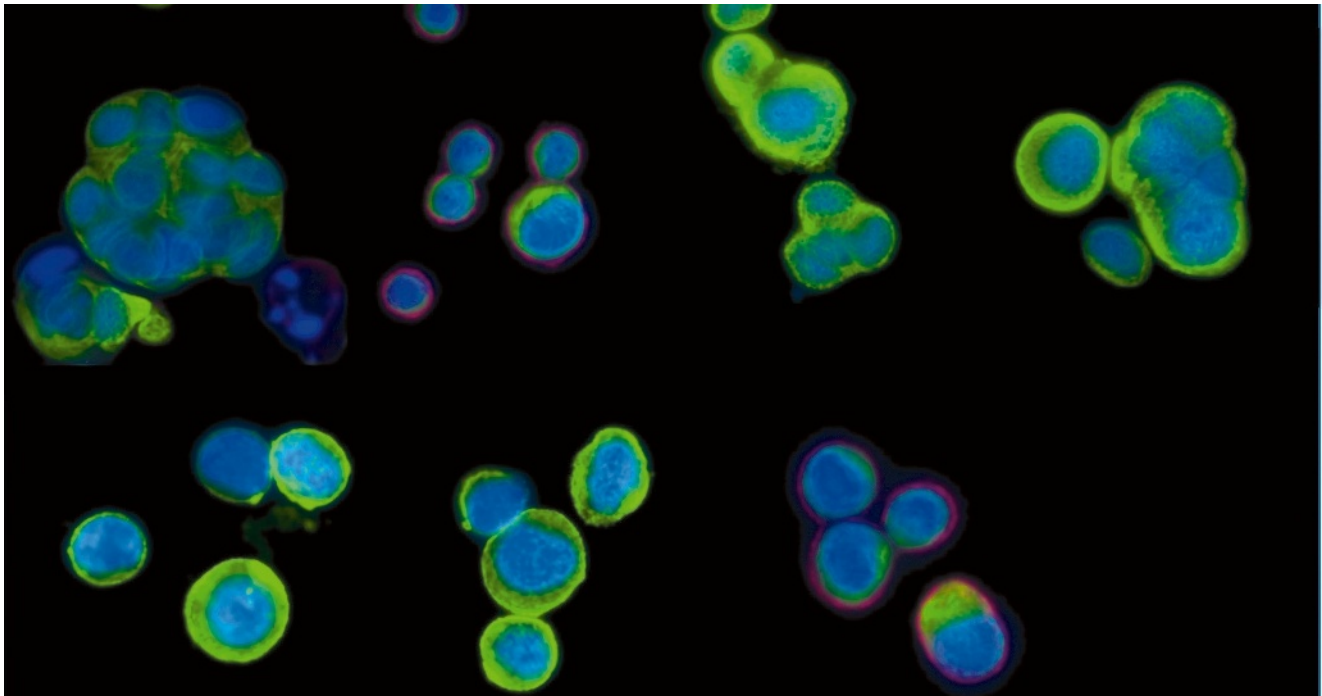
Ces variants aboutissent à un récepteur non fonctionnel. Il a été démontré que la détection du variant d'épissage noté V7 dans les CTC était corrélée à la résistance au traitement par enzalutamide-abiratéron chez des patients souffrant d'un cancer de la prostate métastatique. Autrement dit, la présence de variants V7 parmi les CTC peut constituer un biomarqueur précoce de résistance à ces traitements, et ainsi inciter à changer de stratégie thérapeutique.

Durant la dernière décennie, l'approche de la biopsie liquide a ainsi suscité un fort intérêt de la communauté scientifique. Elle a l'ambition de refléter fidèlement la progression tumorale en temps réel, d'identifier les sous-populations cellulaires les plus agressives, de guider les cliniciens dans le choix de thérapies ciblées et de mettre ainsi en place une médecine personnalisée pour tous les patients atteints d'un cancer solide.

Le système CellSearch, produit par le groupe italien Menarini, est le seul dispositif de détection de cellules tumorales circulantes homologué aux États-Unis. Les tests automatisés pratiqués sur l'échantillon sanguin livrent leurs résultats à l'écran en trois heures.







Cependant, la variété des techniques déployées n'a pas encore permis de proposer un outil standard aux oncologues. Aussi, les équipes de recherche et leurs partenaires industriels redoublent d'efforts pour proposer rapidement des techniques robustes et reproductibles fondées sur la recherche des CTC ou de l'ADNtc, les deux marqueurs phares de la biopsie liquide.

Il est urgent de proposer des combinaisons de biomarqueurs circulants qui seront en mesure de définir le statut, l'origine et la progression d'un cancer, de façon à guider les cliniciens dans leurs choix thérapeutiques. Dans cette dynamique, le projet européen Prolipsy, soutenu en France par la fondation ARC pour la recherche sur le cancer, étudie comment la biopsie liquide peut aider à la détection précoce du cancer de la prostate en combinant l'analyse des CTC, de l'ADN circulant et des exosomes. Ici, le but avoué est de distinguer les cancers agressifs des autres, mais aussi de choisir des thérapies personnalisées et de gérer les risques de rechute.

Introduire la biopsie liquide en pratique clinique nécessite de lancer davantage d'études interventionnelles. Un bel exemple est l'étude française CTC Metabreast, soutenue par l'Institut national du cancer et publiée en 2020. Elle a mobilisé de nombreux établissements hospitaliers de l'Hexagone, particulièrement l'Institut Curie (Jean-Yves Pierga et François-Clément Bidard), l'Institut du cancer de Montpellier (William Jacot) et le LCCRH. Cette étude a démontré, pour la première fois au niveau mondial, l'utilité clinique des CTC pour définir les orientations thérapeutiques (chimiothérapie *versus* hormonothérapie) les plus efficaces

Ces cellules (isolées et en amas sphéroïdes), vues en microscopie à fluorescence, sont des cellules tumorales circulantes (CTC) initiatrices de métastases cultivées *in vitro*. Elles ont été obtenues au LCCRH à partir du sang d'un patient atteint d'un cancer du côlon métastatique. Ces CTC ont un profil d'expression des gènes bien distinct de celui des cellules des tumeurs primaires ou secondaires.

pour des patientes souffrant de cancer du sein métastatique. Et toujours en France, depuis 2019, l'équipe de Catherine Alix-Panabières participe avec Stéphane Culine, de l'hôpital Saint-Louis, à Paris, à une nouvelle étude clinique interventionnelle visant à démontrer le bénéfice clinique de la détection de CTC dans le cancer de la prostate métastatique.

## HARMONISER LES PRATIQUES

Il est nécessaire d'harmoniser les pratiques de préparation des échantillons sanguins ainsi que les modalités d'analyses des différents biomarqueurs circulants pour les différents types de cancers solides. Cela exige de définir des protocoles standardisés acceptés et validés par l'ensemble des experts de la biopsie liquide. Un tel projet suppose un effort commun des équipes de recherche et des cliniciens au sein de grands consortiums, tels que la Société européenne de biopsie liquide (ELBS), qui a été créée début 2020 et qui compte déjà des centaines de membres actifs.

Le célèbre MIT (l'institut de technologie du Massachusetts) dresse tous les ans, dans la *MIT Technology Review*, une liste des défis auxquels sera confrontée l'évolution technologique dans les années à venir. La biopsie liquide et la médecine hyperpersonnalisée sont citées respectivement dans les éditions de 2015 et 2020. De même, la revue *Nature* a présenté en décembre 2020 la biopsie liquide comme étant une thématique majeure des vingt dernières années. Il est fort à penser que, dans la prochaine décennie, les progrès accomplis dans ces deux domaines écriront les futures pages de la biologie et de la médecine. ■

## BIBLIGRAPHIE

H. Sung *et al.*, **Global cancer statistics 2020 : GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries**, *CA Cancer J. Clin.*, vol. 71(3), pp. 209-249, 2021.

C. Alix-Panabières et K. Pantel, **Liquid biopsy : From discovery to clinical application**, *Cancer Discovery*, vol. 11, pp. 858-873, 2021.

C. Alix-Panabières, **The future of liquid biopsy**, *Nature*, vol. 579, S9, 2020.

P. Hofman *et al.*, **Liquid biopsy in the era of immuno-oncology : Is it ready for prime-time use for cancer patients ?**, *Ann. Oncol.*, vol. 30, pp. 1448-1459, 2019.

## L'ESSENTIEL

> La violence s'exprime sous une telle diversité de formes qu'il est difficile de l'appréhender de façon abstraite et dans sa globalité.

> L'approche anthropologique, qui s'attache au quotidien de la vie sociale sur le temps long, aide à mieux en cerner les différentes expressions et les contextes qui la font émerger.

> L'anthropologie met aussi en lumière les partis pris dont il faut être conscient lorsqu'on tente de comprendre une situation de violence et d'y remédier, comme le risque de jugement moral lié à sa propre posture.

## L'AUTEUR



## CHARLES-ÉDOUARD DE SUREMAIN

anthropologue, directeur de recherche de l'IRD et directeur de l'unité Patrimoines locaux, environnement et globalisation au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris

# L'hydre de la violence humaine

Qu'est-ce que la violence ? Si nous en avons tous une intuition ou une expérience, comment la décrire, la désigner et la comprendre ? L'anthropologie propose des clés pour décrypter les différents aspects de ce phénomène protéiforme.

**A**u début des années 2000, lorsque j'étais sur le terrain en Bolivie, dans la région amazonienne et cocalifère du Chaparé, j'ai été témoin d'une violente bagarre domestique : un homme frappait une femme devant un nouveau-né en plein village. Je suis alors intervenu pour tenter de séparer les protagonistes. Autant ai-je facilement esquivé les poings de l'assaillant complètement ivre, autant n'ai-je pu échapper aux coups de pied donnés... par son épouse ! Perplexe et sans réaction, je fus encore plus dépité lorsque celle-ci, après m'avoir craché au visage, me lança : « De quoi tu te mêles ? C'est mon mari, il fait ce qu'il veut de moi. »

Cette scène n'était-elle violente qu'à mes yeux, parce qu'elle venait heurter mes représentations des rapports entre hommes et femmes ? Comment l'interpréter dans une perspective anthropologique, et prendre de la hauteur pour rendre compte d'un phénomène qui vient

contrecarrer mon propre système de représentation ? Faut-il tout relativiser ? Tout est-il une question de contexte ? Ces questions sont quelques-unes de celles que se posent les anthropologues qui s'attachent à mieux comprendre la violence à partir de leurs terrains d'étude.

De fait, pour l'anthropologue, il est en quelque sorte « naturel » de partir de ce qu'il observe et entend à un moment et dans un contexte donnés pour induire autant d'hypothèses plausibles sur la compréhension plus générale des phénomènes, qu'ils soient liés à l'alimentation, au religieux, à l'enfance, à la parenté, au pouvoir, aux relations avec les non-humains... Pour autant, alors que la plupart des terrains de l'anthropologue sont marqués par une forme ou une autre de violence, celle-ci ne figure pas vraiment parmi les objets « classiques » de la discipline. Probablement parce qu'il est particulièrement difficile de la décrire, de la mettre en contexte et de la catégoriser – sans tomber dans les jugements moraux ou





le réductionnisme des indicateurs mesurables utilisés dans l'action publique.

Néanmoins, avec son regard à la fois distancié (qui prend de la hauteur) et impliqué (qui s'engage dans l'action sur un temps long et s'attache au détail, à la vie sociale au quotidien et sous toutes ses formes – usages, pratiques, représentations, manières de penser...), l'anthropologie a sans doute quelques enseignements à fournir sur la façon d'appréhender la violence, et donc d'agir sur elle.

En 1996, l'anthropologue Françoise Héritier a proposé la définition suivante de la violence: «[...] toute contrainte de nature physique ou psychique susceptible d'entraîner la terreur, le déplacement, le malheur, la souffrance ou la

**Quelles circonstances ont conduit des individus à brûler plus de 200 voitures à Strasbourg durant la nuit du Nouvel An 2020?**

mort d'un être animé; tout acte d'intrusion qui a pour effet volontaire ou involontaire la dépossession d'autrui, le dommage ou la destruction d'objets inanimés.»

## **À LA FOIS UNIVERSELLE ET PROTÉIFORME**

En d'autres termes, la violence n'existe pas seulement entre humains ou entre humains et animaux, mais aussi entre humains et non-humains au sens large, par exemple lors de la destruction – volontaire ou non – du patrimoine naturel, matériel ou immatériel commun à l'humanité. Particulièrement englobante, cette définition souligne l'universalité de la violence et la difficulté de l'appréhender de





façon abstraite. Enfin, si la violence peut être interprétée comme une tentative de domination sur autrui, ses expressions semblent relever d'ordres différents.

En effet, quoi de commun entre la violence verbale, difficilement mesurable compte tenu de l'évolution des codes de communication, et la violence politique – cette dernière pouvant se présenter comme « légitime » pour combattre des formes de domination insoutenables telles que la mise en esclavage, la précarité économique ou l'invisibilité culturelle? Protéiforme, la violence est aussi polysémique.

## L'IMPORTANCE DE CONTEXTUALISER

La violence est cependant toujours une atteinte au corps, à la dignité et aux valeurs, en somme au « vécu » d'une personne ou d'un collectif. Face à l'universalité du phénomène et à la diversité de ses formes d'expressions, l'anthropologie invite à la plus grande prudence, et c'est sans doute l'un de ses principaux enseignements. Sur le plan méthodologique, les anthropologues insistent sur la nécessité de décrire, en contexte, les expériences et les faits auxquels renvoie la violence. Il est indispensable de la qualifier précisément: est-elle physique, verbale, psychologique, culturelle, symbolique, sociale, individuelle, collective, tacite, implicite ou encore politique?

Au demeurant, parler de violence implique d'engager un travail de réflexivité sur sa propre posture, afin d'éviter les verdicts à connotation morale sur la situation observée. Dans toutes les sociétés, du passé comme contemporaines, qualifier la violence dévoile des positionnements éthiques et politiques, et met au jour des modèles plus ou moins explicites du juste et de l'injuste.

Un exemple frappant de cette complexité est celui de la « fessée ». Autrefois considérée comme un châtiment « éducatif » et « ordinaire », cette pratique de punition corporelle est désormais reconnue, en France du moins, comme une forme de maltraitance infantile. La mobilisation des concepts en faveur ou à l'encontre de la fessée selon l'époque – on parle de sanction, de prévention, d'éducation, de punition, de faute... – illustre l'ambivalence des débats et le fait que la violence reste une construction sociale, c'est-à-dire qu'elle est le produit d'interactions de personnes, institutions, façons de faire et de penser, et valeurs rattachées à un contexte donné. En la matière, le Brésil est l'un des premiers pays à avoir juridiquement condamné la fessée. Comme l'a expliqué la psychiatre et anthropologue Claire Mestre en 2018, la fessée montre que la violence, du point de vue de l'anthropologie, n'existe pas de façon archétypale ou absolue: elle doit être qualifiée, située, mise en contexte et combattue en toute connaissance de cause.

« L'emprise de la violence sur l'individu ou les collectifs peut conduire à son acceptation »



## TRIBUNES DU MUSÉUM

CHARLES-ÉDOUARD DE SUREMAIN interviendra le samedi 4 décembre après-midi lors de la Tribune Histoire naturelle de la violence du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris.

Événement gratuit, informations sur [mnhn.fr/tribunes-violence](http://mnhn.fr/tribunes-violence)

Une autre difficulté liée à l'analyse de la violence tient à la minoration de certains faits qui surviennent dans la vie quotidienne – les insultes à l'école, les incivilités dans les transports en commun, les tensions au travail... – au prétexte qu'ils ne laissent pas de traces tangibles ou facilement appréciables. Se pose le problème de la mise en perspective: ce qui est violent pour les uns ne l'est pas systématiquement pour les autres, cela en toute bonne foi. Ainsi, la corrida n'est pas violente aux yeux des aficionados alors qu'elle en incarne la figure archétypale pour ses détracteurs. Il en va de même pour les combats de coqs en Asie ou ceux de chiens en Amérique latine, qui divisent populations et législateurs.

Il y a également la difficulté à aborder la question du consentement, ou de l'aliénation, face à l'emprise exercée par la violence sur l'individu ou les collectifs: cette emprise peut conduire à son acceptation, par exemple dans le cas de certaines agressions sexuelles, ou à des formes de résistance plus ou moins passives.

## PLUSIEURS NIVEAUX D'INTÉGRATION DE LA VIOLENCE

Autre enseignement de l'anthropologie: la catégorisation des formes de violence. Même si cette dernière est protéiforme et propre à chaque contexte, il est possible d'en déceler différents niveaux d'intégration dans les sociétés humaines.

À l'échelle des individus, les violences entre personnes ou collectifs résultent de conflits pour des ressources matérielles ou des réactions affectives, ou encore de l'affirmation de positions statutaires, identitaires ou de domination. Mais la frontière avec le niveau d'intégration supérieur, celui de la société ou de l'État, est parfois ténue. Le cas du viol l'illustre.

Le fait que le viol soit individuel ne signifie pas pour autant qu'il n'est pas social: les viols, incestueux ou non, interrogent, à un niveau collectif, les relations entre les hommes et les femmes, entre les adultes et les enfants, le rapport au corps dans l'espace public et privé ou encore les représentations de la sexualité, notamment dans les médias et les réseaux sociaux.

Depuis 2008, le viol est aussi reconnu comme « arme de guerre » par le Conseil des Nations unies. Marquant le corps des victimes de la domination (de genre, ethnique ou encore politique...) exercée par leurs bourreaux, le viol de guerre entraîne l'anéantissement parfois définitif des individus au sens social, psychique et physique du terme. Dans les faits, il participe souvent d'une entreprise plus globale d'épuration ethnique d'une société en imposant notamment la maîtrise de la procréation et de la filiation.



## GÉNOCIDÉ RWANDAIS : LE POIDS DE L'IDÉOLOGIE

**L'**analyse du génocide des Rwandais tutsi, en 1994, montre la difficulté à contextualiser la violence et l'importance de l'idéologie. Sociologue spécialiste de la région des Grands Lacs africains, André Guichaoua, présent au Rwanda aux premiers jours du génocide, a livré en 2010, dans son ouvrage *Rwanda : de la guerre au génocide*, les résultats de ses quinze années d'enquête sur l'avènement de ce drame.

Le déterminisme démographique – surpeuplement, pression foncière, lutte pour la vie,

De fait, au niveau social, la violence repose en général sur une idéologie. Comme l'explique l'anthropologue Maurice Godelier, qui voit dans la violence la source de toutes les formes de domination, il n'y a pas de reproduction des rapports de domination sans une mixtion de violence et de consentement plus ou moins explicite. Et c'est en imaginant des idéologies que l'homme et les sociétés rendent possible la violence et donc la domination. Les idéologies, du fait qu'elles ne sont pas perçues comme « imaginaires » par celles et ceux qui y croient, ont en effet des implications bien réelles en termes de violence et de domination, notamment politiques, religieuses et sexuelles.

C'est ce que montrent les premières formes d'État comme l'Égypte pharaonique ou les empires aztèque et inca, dont les sujets acceptent la violence sacrificielle et la domination sans partage du fait de la prédisposition « imaginée » de leurs rois à contrôler le cosmos, l'environnement et les humains, en somme l'ordre social tout entier. On pense aussi, plus récemment, à l'analyse des événements qui ont conduit au génocide des Rwandais tutsi, en 1994 (voir l'encadré ci-dessus).

Un autre niveau de violence, plus systémique, apparaît lorsque des catégories de population sont tenues à l'écart des ressources économiques et sociales par le fonctionnement des institutions, comme dans le cas de l'Apartheid, notamment. Le ressenti d'impuissance politique façonné chez ces populations se traduit par l'extrême difficulté de la vie quotidienne, le handicap, le retard scolaire ou encore la maladie, comme l'explique l'anthropologue Didier Fassin en 2006 lorsqu'il évoque les causes politiques de la prévalence du sida en Afrique du Sud.

du fait de la géographie montagneuse et pauvre en ressources du pays – est souvent invoqué pour expliquer les événements. Mais, pour lui, ces raisonnements sont des reconstructions *a posteriori* de la réalité, pour la plupart difficiles à justifier scientifiquement. Son enquête sur la conduite de la guerre à partir de 1990 et la mise en œuvre du génocide souligne que les décisions ayant conduit à cette situation relèvent autant de choix stratégiques que de motivations opportunistes de la part des protagonistes. En particulier, l'initiative des massacres, puis leur mise en œuvre, reposaient sur les unités de l'armée fidélisées et les forces miliciennes de Kigali rattachées directement aux seuls décideurs en cas de crise : les officiers adoubés par le clan présidentiel. Le poids de l'idéologie est resté très présent dans les débats autour de la mémoire de ces événements, entre dénégaration du génocide pour les uns, diabolisation d'un régime pour les autres, et controverses sur la comptabilité des morts des deux camps pour neutraliser le débat.

### BIBLIOGRAPHIE

M. Godelier, *L'Imaginé, l'imaginaire et le symbolique*, CNRS, 2015.

D. Dussy, *Le Berceau des dominations. Anthropologie de l'inceste*, La Discussion, 2013.

V. Nahoum-Grappe, *Violences sexuelles en temps de guerre*, *Inflexions*, vol. 2(17), pp. 123-138, 2011.

F. Héritier (éd.), *De la violence : séminaire de Françoise Héritier*, Tome 1, Odile Jacob, 1996.

La pauvreté est l'une des déclinaisons de la violence systémique, et est elle-même source de multiples violences individuelles, parfois dans des circonstances inattendues. Prenons un exemple. À l'entrée de certains temples en Inde, des macaques agressent les touristes qui s'affranchissent de leur payer leur dû – leur distribuer des cacahuètes achetées à leurs comparses humains, lesquels se tiennent toujours à proximité. N'est-ce pas la violence de la situation de pauvreté ambiante qui génère cette cascade d'agressions? La pauvreté conduit d'abord les hommes à stimuler l'agressivité des macaques envers les touristes, lesquels s'en prennent aux singes et, surtout, aux vendeurs de cacahuètes. Se met en place une sorte de mise en abyme de la violence dont la pauvreté serait à l'origine.

### FORMES DE VIOLENCE ÉMERGENTES

Enfin, depuis quelques années, des anthropologues s'intéressent à des violences relevant de l'ordre planétaire, qui touchent des biens communs de l'humanité. Il s'agit par exemple des sites à forte valeur patrimoniale comme ceux de Tombouctou, dynamités volontairement en 2012, ou de ceux saccagés par le développement du tourisme de masse en Asie. On peut encore parler de la violence faite à l'environnement, auquel cas il est question de « délits », de « crimes » ou d'écocides. Particulièrement difficiles à appréhender du fait de leur articulation aux autres déclinaisons de la violence, ces destructions renvoient à l'incertitude des sociétés contemporaines, qu'elle soit politico-religieuse ou économique.

Le concept médiatisé de « réfugié climatique », étroitement lié à celui d'écocide, reflète à ce titre une forme de violence à la fois planétaire, sociale et individuelle de plus en plus répandue. Pourtant, il reste insuffisamment pris en compte et ne bénéficie pas de reconnaissance légale et statutaire. Comme l'a auguré le sociologue Serge Dufoulon en 2013 : « Les réponses des démocraties pourraient [...] devenir aussi violentes que les événements climatiques à l'origine de l'émergence de populations ou de groupes de migrants environnementaux. » Le traitement global (pas uniquement juridique) réservé aux écocides et aux réfugiés climatiques est directement lié à la violence du « climat » social et politique qui imprègne nos sociétés, alors même que se profile l'urgence de la transition sociale et environnementale.

On le voit ici encore, la violence est surtout une question de contexte, de qualification et d'expérience. Plutôt que parler de « germes » de la violence, ce qui sous-entend l'existence d'une forme initiale dont l'humanité serait porteuse, il serait donc peut-être plus juste de parler de « semences » de la violence, pour rappeler qu'elle émerge rarement spontanément. ■

## L'ESSENTIEL

> Chez les primates non humains, les comportements agressifs jouent un rôle clé dans la régulation des groupes sociaux.

> Ces comportements sont en général des manifestations non physiques.

> Mais, dans de rares circonstances, il arrive que ces comportements dégèrent en violence physique, conduisant parfois à la mort d'un des adversaires.

> Le déclencheur est souvent un changement de l'environnement, mais parfois aussi le tempérament d'un individu.

## L'AUTRICE



**SHELLY MASI**  
primatologue, maîtresse de conférences au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, au sein de l'unité Éco-Anthropologie

# La violence, une exception chez nos proches cousins?

Il est rare que les chimpanzés ou les gorilles deviennent violents, mais certains événements changent parfois la donne...

**M**lima était un gorille mâle dos argenté des aires protégées de Dzanga-Sangha, en République centrafricaine, où j'effectue mes missions depuis 2000.

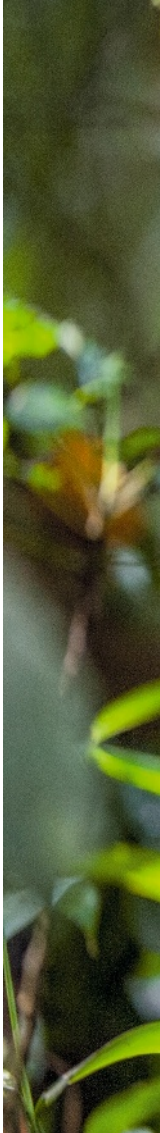
En 2004, devenu vieux, il avait perdu toutes ses femelles, qui ne le sentaient plus assez puissant pour les protéger des autres dos argentés. Mais après des mois de recherche d'une nouvelle femelle, Mlima avait enfin trouvé Samba, une adolescente qui avait un problème à un œil. Cependant, une semaine plus tard, un autre mâle dos argenté l'a attaqué. Mlima s'est battu de toutes ses forces, car c'était sa dernière chance d'acquiescer une femelle. Mais, à l'issue du combat, l'autre mâle est reparti avec Samba, abandonnant Mlima à ses blessures. Le vieux gorille est mort la nuit même.

S'agit-il de violence? La réponse n'est pas simple et ce terme est peu employé en éthologie. En effet, les agressions font partie du répertoire comportemental normal des animaux pour défendre un territoire, la nourriture, un partenaire, un statut social de dominance ou sa propre famille. Elles ont donc une fonction biologique spécifique dans les interactions sociales. Il arrive cependant

qu'une agression dévie du comportement habituel de l'espèce. Les zoologistes parlent alors de « comportement violent ». Depuis une trentaine d'années, les primatologues s'intéressent de près à ces comportements et aux conditions de leur apparition. Leurs études ouvrent plusieurs pistes pour comprendre d'où vient la violence humaine.

## DES LUTTES EN GÉNÉRAL NON PHYSIQUES

Les comportements agressifs résultent d'une interaction de deux individus ou plus, et leur intensité est liée au contexte. Ils interviennent chez les espèces territoriales (qui défendent leur territoire et ses ressources, comme les chimpanzés) ou en défense du groupe familial (partenaires sexuels, enfants) contre d'autres mâles, comme chez les gorilles et les lions. Chez les gorilles, les interactions agressives des mâles dos argenté sont généralement des démonstrations de force pour décourager l'adversaire de s'approcher du groupe familial et de « voler » des femelles ou, pire, tuer un enfant. De fait, l'infanticide est un moyen de « libérer » des femelles adultes: une fois perdu leur enfant, elles quittent leur groupe pour rejoindre un autre mâle dos argenté.







La plupart du temps, ces luttes entre mâles dos argenté ne sont pas physiques, mais elles le deviennent jusqu'à entraîner la mort d'un des adversaires dans certaines situations particulières, par exemple quand le prix est trop élevé, comme dans le cas de Mlima. De même, chez nombre d'espèces animales, on observe des attaques intenses plutôt vocales entre individus d'un même groupe social. Ces interactions régulent les relations sociales comme la hiérarchie, nécessaire pour diminuer les conflits pour l'accès à la nourriture et aux partenaires sociaux et sexuels.

En effet, un ensemble de codes comportementaux de domination – vocalisations agressives du dominant, menaces (montrer les dents), parades (chez les loups et les primates, notamment) – et de soumission permet aux animaux de gérer la violence et d'éviter de se battre à chaque interaction, en établissant le rang relatif des membres du même sexe. Chez les primates à hiérarchie stricte, tels les chimpanzés et certains macaques, les mâles subordonnés laissent le passage au mâle dominant, l'accès prioritaire à la nourriture, aux partenaires sexuels, ou lui adressent des vocalisations de salutation ou de soumission. Chez les chimpanzés, les individus de rang inférieur épouillent

souvent ceux de rang supérieur dans l'espoir de recevoir des avantages tels que la protection, l'acceptation et un épouillage réciproque. Le cas des bonobos est particulier: souvent, ils apaisent leurs conflits par des actes sexuels.

Un autre type d'agression au sein d'une même espèce est la coercition sexuelle: l'utilisation de l'attaque, de menaces et du harcèlement par les mâles pour forcer les femelles à s'accoupler – les scientifiques le comparent à des agressions sexuelles ou au viol entre humains et le nomment «violence». Cette technique de harcèlement est documentée depuis plusieurs dizaines d'années chez les mâles de différentes espèces de dauphins, d'ours, d'ongulés et de primates, mais aussi chez des insectes et des poissons. Parmi les mammifères, les orangs-outans de Bornéo sont les plus agressifs dans ce sens: dans près de 90% de leurs copulations, les mâles se montrent agressifs, y compris lorsque les femelles ne résistent pas. Chez les primates, cela semble un moyen pour les mâles d'entraîner les femelles à avoir peur d'eux et à céder davantage aux futures avances sexuelles. Chez les dauphins, les femelles resteraient dans des eaux peu profondes non fréquentées par les mâles afin d'éviter les blessures, pour elles et leurs petits. En effet, le principal coût direct de la coercition

Chez les chimpanzés, les comportements liés à l'attitude agressive, tels que montrer ses dents, sont des signaux clés qui permettent d'éviter les conflits.



## TRIBUNES DU MUSÉUM

**SHELLY MASI**  
interviendra le samedi  
4 décembre après-midi lors  
de la Tribune **Histoire naturelle  
de la violence** du Muséum  
national d'histoire naturelle,  
à Paris.

Événement gratuit,  
informations sur  
[mnhn.fr/tribunes-violence](http://mnhn.fr/tribunes-violence)



## L'ORIGINE DE LA GUERRE

**Il arrive que des communautés de chimpanzés s'affrontent. Un signe que la guerre serait un héritage de notre ancêtre commun? La réponse n'est pas si simple...**

**L**es primatologues qui s'intéressent à l'origine de la guerre la définissent comme une violence impliquant des groupes d'animaux. Une telle violence dite «de coalition» est rare dans le règne animal. Cependant, la guerre semble exister chez d'autres espèces qu'*Homo sapiens*, y compris chez nos cousins les chimpanzés. La première, Jane Goodall a observé, en 1974 dans le parc tanzanien de Gombe Stream, que les chimpanzés de deux communautés voisines étaient violents les uns envers les autres. Elle a appelé «guerre» cette violence, car elle a duré environ quatre ans, durant lesquels la plus grande communauté «envahissait systématiquement» le territoire de la plus petite, en attaquant tous les membres de la communauté adverse rencontrés et en les laissant mourir de leurs blessures, jusqu'à anéantir toute sa population. Elle a défini ces attaques comme brutales, très violentes, les envahisseurs prenant la tête d'une victime et buvant le sang qui coulait de son nez, tordant un membre, déchirant des morceaux de peau avec leurs dents... Jane Goodall a qualifié ces comportements de violents, car jamais ils n'avaient été observés vis-à-vis d'un mort de la même communauté. Au contraire, les chimpanzés montrent envers leurs morts des comportements ressemblant à de la compassion. Ces événements étaient d'autant plus troublants que, quelques années auparavant, les deux communautés n'en formaient qu'une. Victimes et attaquants avaient donc grandi ensemble.

Sur ces bases, en 1996, le primatologue britannique Richard Wrangham a formulé l'hypothèse que cette violence mortelle existait déjà chez les ancêtres communs des humains et des autres grands singes, et que nous aurions hérité de ces ancêtres une sorte de prédilection pour la guerre. Il soutient que les tueurs trouvent des avantages dans cette violence collective, car en éliminant un mâle d'une autre communauté, ils réduisent la capacité de leurs voisins à se reproduire et, en même temps, augmentent l'accès de leur communauté au territoire, et donc à la nourriture. Selon Richard Wrangham, ces attaques létales ne sont pas tant une escalade d'hostilités existantes qu'un «appétit» pour chasser et tuer des rivaux, «semblable à la prédation». Cet appétit aurait été sélectionné au fil de l'évolution parce qu'il fournit plus de ressources pour peu de risques, les attaques visant surtout des individus isolés. Pour lui, les observations suggèrent que cette tendance est liée aux conditions de vie des chimpanzés – peut-être similaires à celles de nos ancêtres humains –, notamment au fait que leur société est caractérisée par la fusion et la fission de groupes et une hostilité entre groupes.

Mais de nombreux anthropologues ont rejeté les arguments de Richard Wrangham, refusant de voir dans la guerre un «instinct de tueur» dont nous aurions hérité.

C'est pour cette raison que les primatologues s'interrogent de plus en plus sur la présence de la guerre chez nos cousins vivants les plus proches, les chimpanzés et les bonobos. En 2010, dans une réponse à Richard Wrangham, les anthropologues américains Robert Sussman et Joshua Marshack ont souligné que chez la plupart des animaux, les combats sont des manifestations d'agression plutôt que des agressions physiques et que, même dans ce cas, ils sont rarement mortels. Ils soutenaient que la «guerre» des chimpanzés n'est pas du tout un comportement inné, mais plutôt le résultat des actions humaines, qui encouragent cette agressivité, comme la destruction de l'habitat, qui signifie que les communautés de chimpanzés sont obligées de vivre plus près les unes des autres, ce qui crée plus de concurrence pour les ressources. Pour les deux anthropologues, une deuxième explication de la «guerre» chez les chimpanzés était le fait que Jane Goodall les a nourris pour les rapprocher. Les chimpanzés seraient devenus plus agressifs à cause des disputes pour ces aliments de haute qualité.



### Parmi les mammifères, notre espèce est particulièrement violente



Le débat a été partiellement résolu en 2014, par une équipe autour de Michael Wilson, à l'université du Minnesota, et Richard Wrangham. Celle-ci a recueilli des informations sur tous les meurtres observés ou suspectés dans les communautés de chimpanzés sauvages suivies depuis plus de dix ans. Environ les deux tiers étaient dus à des membres d'une autre communauté, et aucune corrélation n'a été trouvée entre les impacts humains et le taux des meurtres. De plus, la taille de l'aire protégée ne semble pas avoir eu d'effet sur leur fréquence. Ces résultats suggèrent une tendance naturelle à la guerre de nos cousins vivants les plus proches.

Mais le débat continue et d'autres chercheurs soulignent que, dans cette étude, seuls deux sites de recherche sur les chimpanzés (Kibale et Boudongo, en Ouganda) sont responsables de près de 60% de tous les décès. La survenue de meurtres entre communautés est donc assez rare en dehors de certains groupes, voire de certains individus. De son côté, l'équipe de Michael Wilson et Richard Wrangham a aussi analysé les données des bonobos

et n'y a trouvé qu'un seul meurtre présumé dû à une autre communauté. Difficile, donc, d'en conclure si l'ancêtre commun des humains, des chimpanzés et des bonobos était violent ou pacifique. Cependant, une autre étude plus large publiée en 2016 par José María Gómez, de l'université de Grenade, en Espagne, et ses collègues, a montré que les primates, dont font partie les grands singes, constituent un groupe d'espèces où le niveau de violence létale (la proportion, pour une espèce donnée, des décès provoqués par une interaction de congénères) est assez élevé par rapport à celui dans d'autres groupes de mammifères.

Les chercheurs ont comparé les niveaux de violence létale de 1024 espèces de mammifères. Résultat : les espèces les plus sociales et les plus territoriales sont celles dont le niveau de violence létale est le plus élevé. En outre, la violence létale semble aussi héréditaire, car, dans l'arbre phylogénétique des mammifères, une espèce a plus de chances d'être violente si, plus haut dans son lignage, une autre espèce a un niveau élevé de violence létale.

La violence létale se concentre ainsi principalement chez les primates, certains rongeurs et les carnivores. Le niveau de violence létale est de 1,8% à l'embranchement des grands singes et il augmente à 2% à l'embranchement de notre espèce, soit six fois plus qu'à l'embranchement des mammifères. En d'autres termes, notre espèce est particulièrement violente parmi les mammifères. Du moins l'était-elle à ses débuts, car, depuis, le niveau de violence létale a changé au cours de l'histoire de l'humanité, modulé au gré des évolutions de l'organisation sociopolitique des populations humaines.

Depuis un quart de siècle, la fréquence des violences létales dans le monde n'a cessé de baisser, selon un rapport des Nations unies sur les homicides publié en 2019. Toutefois, notre espèce a aussi développé d'autres types de violences non physiques : une personne peut subir la violence d'une autre à travers des paroles, des comportements, des gestes ou des silences. Cette caractéristique est-elle propre à notre espèce ou la retrouve-t-on chez d'autres primates ? Si la question reste entière, certains primates non humains semblent eux aussi avoir les capacités cognitives pour développer ce type de violence. C'est le cas, des macaques à longue queue sauvages du temple d'Uluwatu, à Bali, en Indonésie. Ces singes montrent très fréquemment ce type de comportement envers des touristes visitant le temple. Ils leur volent des objets, en général de grande valeur pour les visiteurs – tablettes, téléphones, lunettes de soleil, sacs, chapeaux, eau –, et ne les relâchent qu'en échange de nourriture. Une forme de troc doublé de chantage!



sexuelle pour les femelles est la blessure physique. Chez certaines espèces comme les éléphants de mer, l'accouplement entraîne parfois la mort de la femelle des suites de ses blessures.

## DES COMPORTEMENTS VIOLENTS ISOLÉS

L'agressivité faisant partie des interactions sociales des animaux, les zoologistes ont défini un « comportement violent » chez les animaux comme une agression trop intense, imprévisible, qui dévie du comportement habituel de l'espèce. Plusieurs facteurs sont susceptibles de produire de telles variations.

L'un d'eux réside dans les changements de l'environnement, comme des modifications de l'habitat qui limitent les ressources, et augmentent la concurrence. Une croissance soudaine de la densité des gorilles de montagne au Rwanda en 2007, à la suite des efforts internationaux pour la conservation de cette sous-espèce très menacée, a ainsi triplé la fréquence de rencontres violentes entre groupes et mâles solitaires. En 2020, Damien Caillaud et ses collègues, du Dian Fossey Gorilla Fund, aux États-Unis, ont enregistré une multiplication par cinq de la fréquence des infanticides et sept cas de bagarres meurtrières entre mâles matures, d'habitude très rares. L'augmentation des infanticides explique à elle seule 57% de la diminution du taux de croissance annuel de la sous-population entre 2000 et 2017.

La pression anthropique sur l'environnement et la diminution consécutive de l'habitat d'une espèce peuvent aussi augmenter la fréquence des rencontres entre animaux d'une même espèce, voire entre animaux et humains. Il arrive alors que certains individus sortent de leur habitat habituel et, pour se défendre ou par peur, attaquent les humains vivant en bordure et soient perçus comme violents.

Mais la « violence » chez les animaux est parfois le résultat du tempérament d'un individu. Par exemple, dans le parc tanzanien de Gombe Stream, où la primatologue britannique Jane Goodall a étudié les chimpanzés pendant des années, un mâle, Frodo, était connu au début des années 2000 pour se rendre au village, kidnapper et tuer des bébés humains. Il reste toujours aujourd'hui un cas isolé. Et, tout récemment, Lara Southern, de l'université d'Osnabrück et de l'institut Max-Planck d'anthropologie évolutive de Leipzig, en Allemagne, et ses collègues ont documenté pour la première fois, au Gabon, des attaques en groupe de chimpanzés sauvages contre des gorilles. Les chimpanzés ont tué des bébés gorilles, un comportement jamais observé chez des chimpanzés sauvages. Ces attaques sont d'autant plus surprenantes qu'en général les rencontres entre gorilles et chimpanzés sont pacifiques. Or les chimpanzés se sont mis parfois à neuf



pour attaquer une femelle gorille et son petit. Le mâle dos argenté, quant à lui, a pris la fuite, signe qu'il connaissait le danger.

Avant ces attaques, les chimpanzés patrouillaient la bordure de leur territoire, un comportement coopératif typique des mâles pour défendre leur territoire et ses ressources contre l'invasion des communautés voisines. Le comportement violent vis-à-vis des gorilles est donc peut-être l'innovation d'un individu lors d'une patrouille usuelle quand, n'ayant pas trouvé de chimpanzés de la communauté voisine, les patrouilleurs ont rencontré des gorilles. Les patrouilles s'accompagnent de forts moments d'excitation, qui ont pu inciter un individu à menacer les gorilles, bientôt suivi des autres mâles. Puis la situation a dégénéré en une attaque mortelle, comme s'il s'était agi de chimpanzés de la communauté voisine. Mais peut-être les gorilles mangeaient-ils sur un arbre à fruit de leur territoire. Depuis, le comportement violent de cette communauté de chimpanzés est devenu habituel envers tous les gorilles rencontrés sur leur territoire.

Et si des événements similaires s'étaient aussi produits pendant notre évolution? Une hypothèse des paléanthropologues pour expliquer la disparition de l'homme de Néandertal est qu'*Homo sapiens* en ait été la cause. Des interactions agressives du même type que celles des chimpanzés et des gorilles ont peut-être eu lieu entre ces espèces humaines durant leur cohabitation, voire entre d'autres encore. Par ailleurs, la description des attaques entre communautés voisines de chimpanzés a conduit les primatologues à réfléchir à l'origine de la guerre chez les humains. Le débat, en cours depuis les années 1990, est loin d'être clos (voir l'encadré page ci-contre). Une chose est sûre : que ce soit chez les primates ou les autres animaux, la violence n'est pas usuelle dans la nature, c'est toujours l'exception... ■

Femelle gorille de montagne et son enfant dépendant, photographiés dans leur habitat naturel, en Ouganda. Les petits de cet âge peuvent être victimes d'infanticide par des mâles dos argenté externes au groupe familial.

## BIBLIOGRAPHIE

L. M. Southern *et al.*, **Lethal coalitionary attacks of chimpanzees (*Pan troglodytes troglodytes*) on gorillas (*Gorilla gorilla gorilla*) in the wild**, *Scientific Reports*, vol. 11, article 14673, 2021.

D. Caillaud *et al.*, **Violent encounters between social units hinder the growth of a high-density mountain gorilla population**, *Science Advances*, vol. 6(45), article eaba0724, 2020.

J. M. Gómez *et al.*, **The phylogenetic roots of human lethal violence**, *Nature*, vol. 538, pp. 233-237, 2016.

M. L. Wilson *et al.*, **Lethal aggression in *Pan* is better explained by adaptive strategies than human impacts**, *Nature*, vol. 513, pp. 414-417, 2014.

R. Wrangham et D. Peterson, **Demonic Males : Apes and the Origins of Human Violence**, Houghton Mifflin, 1996.







## L'ESSENTIEL

> Chez la majorité des individus, la fréquence et l'intensité des comportements agressifs diminuent dans l'enfance.

> Mais chez une faible proportion, les conduites agressives persistent à l'âge adulte.

> Les principaux facteurs de risque sont l'influence des pairs et le cadre familial.

> Des mesures préventives visent à développer les capacités relationnelles durant l'enfance.

## L'AUTEUR



**LAURENT BÈGUE-SHANKLAND**  
professeur de psychologie sociale  
à l'université Grenoble-Alpes

# De l'enfant à l'adulte violent

Les comportements agressifs à l'âge adulte ont souvent leurs racines dans l'enfance. Loin d'être déterminés durant le développement de l'enfant, ils pourraient être pris en charge par des mesures préventives.

**E**n 1831, dans son livre *Recherches sur le penchant au crime aux différents âges*, Adolphe Quetelet a publié une courbe qui a marqué la criminologie quantitative.

S'appuyant sur les chiffres de la criminalité en France entre 1826 et 1829, le statisticien belge avait tracé la fréquence des crimes en fonction de l'âge. Il avait constaté une augmentation de la fréquence relative des délits, violents ou non, au cours de l'adolescence jusqu'à un pic au début de l'âge adulte, puis un déclin jusqu'à la fin de la vie. Les statistiques ultérieures de la justice et de la police dans les pays occidentaux ont corroboré ces observations. De fait, depuis le xv<sup>e</sup> siècle, et dans plusieurs villes d'Europe, on constate que le nombre d'auteurs d'homicides augmente fortement dans la classe d'âge des 10-19 ans, puis décroît de manière marquée jusqu'à 40 ans, avant de poursuivre un très lent déclin jusqu'à 70 ans et plus.

Pendant longtemps, les travaux sur le développement de l'agression ont donc évoqué la courbe âge-crime de Quetelet comme un phénomène majeur. En général, les évolutions qu'elle mettait en exergue étaient imputées à la

conjugaison de facteurs biologiques (maturation physiologique) et sociaux (exposition à des pairs délinquants, opportunités déviantes). Mais en 1992, Richard Tremblay, chercheur en criminologie à l'université de Montréal, a envisagé une autre hypothèse: la courbe âge-crime refléterait, au moins en partie, les variations de l'intervention des instances du contrôle social. Autrement dit, l'augmentation des actes de violence enregistrés traduirait simplement l'intolérance croissante des autorités pour la délinquance des adolescents – ce qui conduirait à la sanctionner de plus en plus sévèrement en fonction de l'âge –, et non une véritable élévation générale de la violence suivie d'un déclin.

Pour Richard Tremblay, non seulement les conduites agressives n'augmenteraient pas avec l'âge, mais elles diminueraient chez la majorité des jeunes. Ceux-ci apprendraient progressivement à faire usage d'autres méthodes de communication et d'influence d'autrui en grandissant. L'observation éthologique des interactions des enfants a confirmé que la majorité abandonnait progressivement ce mode de conduite. Dans une vaste recherche démarrée durant les années 1980 au Canada, Richard Tremblay et ses collaborateurs ont montré

## CRUAUTÉ ENVERS LES ANIMAUX ET COMPORTEMENT AGRESSIF

**E**n 1838, Pierre Rivière, un jeune homme de 20 ans aux cheveux et sourcils noirs, front étroit et regard oblique, était jugé pour le triple assassinat de sa mère, sa sœur et son frère, puis condamné à mort. Dans les archives du procès rassemblées par le philosophe Michel Foucault dans son ouvrage *Moï, Pierre Rivière, ayant égorgé ma mère, ma sœur et mon frère* (1973), on découvre qu'il maltraitait rudement et sans motifs ses chevaux, et martyrisait toutes sortes d'autres d'animaux.

Voici ce qu'écrivait le délinquant : « Je crucifiais des grenouilles et des oiseaux, j'avais aussi imaginé un autre supplice pour les faire périr. C'était de les attacher avec trois pointes de clou dans le ventre contre un arbre. J'appelais cela enuepharer, je menais les enfants avec moi pour faire cela et quelques fois je le faisais seul. »

Aujourd'hui, lorsque des tragédies aussi spectaculaires et rares que des meurtres en série ou de masse se produisent, les antécédents des auteurs sont passés au peigne fin, notamment s'il s'agit de jeunes criminels. La cruauté envers les animaux fait partie des indices qui auraient certainement dû inquiéter l'entourage d'Eric Harris et Dylan Klebold qui, le 20 avril 1999 dans le lycée de Columbine, aux États-Unis, ont froidement abattu douze élèves et un enseignant avant de se donner la mort. L'analyse de leur histoire personnelle a montré que ces adolescents de 17 et 18 ans s'étaient vantés d'avoir mutilé des animaux. S'agit-il d'un fait isolé ? L'étude minutieuse des dossiers de 23 auteurs de fusillades en milieu scolaire ayant eu lieu entre 1998 et 2012 confirme que 43 % d'entre eux avaient été violents envers des animaux avant le massacre.

La question des corrélations entre les cruautés envers des victimes animales et humaines est traitée aujourd'hui de manière très systématique. La revue scientifique *Research in Veterinary Science* a recensé 96 publications consacrées à cette question depuis 1960. Dans 98 % des articles, les violences envers les humains et les animaux étaient reliées, ce qu'a confirmé récemment la première enquête réalisée en France sur le sujet auprès de plus de 12 300 adolescents.

La permanence de ce lien statistique a conduit plusieurs autorités publiques à s'intéresser à la manière dont les gens traitaient les animaux afin de déceler ou de prédire les violences envers les personnes. Depuis 2015, la police américaine collecte des données sur les actes de cruauté envers les animaux domestiques, qui sont ensuite mises en relation avec des violences familiales ou des homicides. En psychiatrie, le manuel de référence servant à catégoriser les troubles mentaux prend en compte depuis 1987 les violences commises envers les animaux pour diagnostiquer un problème de comportement. Dans certains pays, les travailleurs sociaux sont sensibilisés au sujet et comptabilisent les signes de maltraitance animale dans leurs indicateurs de problèmes familiaux.

L. Bègue-Shankland, *Face aux animaux. Nos émotions, nos préjugés, nos contradictions*, Odile Jacob, à paraître en février 2022.



qu'une large majorité de garçons des quartiers les plus pauvres avait de moins en moins souvent recours à l'agression physique entre 6 et 15 ans. Seul un petit groupe (4%) ne respectait pas cette tendance et présentait le niveau d'agression le plus élevé, et un autre groupe (14%) n'avait jamais eu de conduite agressive notoire.

Dès lors, il est devenu crucial de s'intéresser aux manifestations précoces d'agression et à leur évolution. Pouvait-on déceler des indices de violence durant l'enfance et, si oui, étaient-ils prédictifs des comportements d'agression chez les adultes ? Ces questions, aussi importantes du point de vue scientifique qu'elles sont sensibles d'un point de vue sociétal, ont suscité plusieurs recherches observationnelles auprès de jeunes enfants dans les crèches, ainsi que des études de suivi longitudinal (au fil des ans) de cohortes. Ces travaux ont mis en évidence un ensemble d'indices plus fréquemment rencontrés durant l'enfance des personnes ayant une conduite agressive à l'âge adulte.

### DES SIGNES PRÉCOCES

Les recherches auprès des bébés ont montré que chez la plupart des enfants, la fréquence des comportements agressifs diminue dès la petite enfance. Si, dès 3 mois, le bébé est déjà capable de reconnaître la colère, une émotion universellement liée à l'agression, ce n'est qu'entre 4 et 7 mois qu'il manifeste lui-même de la colère en réponse à la frustration. L'expression des réactions colériques culmine entre 7 et 23 mois, avec une moyenne de 1,3 éclat de colère toutes les 10 heures. La colère enfantine se manifeste ordinairement par des pleurs, des trépignements, des coups de pied et la projection d'objets.

Les actes d'agression augmentent ensuite graduellement jusqu'à 24 mois avec la marche, et à 2 ans une interaction sociale sur quatre est de nature agressive. L'agression instrumentale notamment – par exemple pousser un autre enfant afin d'accéder à un jouet – est rapportée par 30% des parents à 14 mois, mais par 60 à 75% d'entre eux à 30 mois. Des différences sont déjà perceptibles entre les garçons et les filles. À 17 mois, 5% des garçons et 1% des filles manifestent fréquemment des conduites agressives, et cette différence reste constante à 29 mois.

Durant la deuxième et la troisième année, les formes d'agression se diversifient parallèlement à la maturation de la coordination motrice, et leur fréquence diminue. Les conduites agressives apparaissent lors de conflits avec les pairs par l'usage de la force physique (pousser, frapper, donner des coups de pied) ou, de la part des filles, moins enclines à la violence physique, d'agressions verbales et relationnelles, comme l'exclusion.

Ensuite, les conduites d'agression physique déclinent progressivement, mais celles qui



persistent sont souvent plus violentes. Ainsi, plusieurs analyses longitudinales indiquent qu'avant l'âge de 4 ans environ 10% des enfants se distinguent des autres par une plus forte propension à l'agression. Ces tendances sont-elles appelées à perdurer? Depuis plus de quarante ans, les études révélant que les tendances à l'agression sont chroniques se sont accumulées. Elles montrent que des différences précoces prédisent, dans une proportion significative, les conduites agressives à l'âge adulte. Une recherche a ainsi établi que 73% des garçons condamnés pour délit violent à 18 ans avaient déjà arboré des formes de conduite agressive durant leur enfance, dont les victimes étaient des pairs, mais aussi parfois des animaux (*voir l'encadré page ci-contre*).

En 1979, en agrégeant 16 études longitudinales consacrées à la conduite agressive chez les garçons durant l'enfance et l'adolescence, le psychologue norvégien Dan Olweus a évalué la stabilité de ce comportement. Il a ainsi constaté que les tendances agressives étaient quasiment aussi stables dans le temps que le quotient intellectuel: les comportements agressifs des enfants après un an de suivi étaient statistiquement prévisibles dans 58% des cas, et ils l'étaient encore dans 47% des cas au bout de cinq ans, et dans 36% au bout de dix ans. Ces résultats ne permettent pas de déterminer avec certitude si un enfant sera encore enclin à l'agression à l'âge adulte. Néanmoins, ils montrent qu'un lien existe entre les conduites des jeunes enfants, des enfants, des adolescents et des adultes.

## UN RÔLE DÉTERMINANT DES PAIRS

Plusieurs facteurs extérieurs sont par ailleurs susceptibles de favoriser l'installation du recours à l'agression. Les pairs, en particulier, jouent un rôle déterminant. Les conduites agressives portent atteinte à des victimes, mais compromettent aussi les perspectives sociales de leurs auteurs. Les études sur les affinités à l'école montrent que la plupart des enfants rejettent les pairs agressifs. Or un tel ostracisme représente une source de frustration: en 2005, une équipe américaine a montré de manière expérimentale que des personnes qui venaient d'être victimes d'exclusion au laboratoire étaient plus agressives envers de nouvelles personnes, moins coopératives et prosociales, et plus enclines à tricher par la suite. Une telle hostilité n'est pas sans effets.

En 2003, dans une étude sur les fusillades ayant eu lieu dans les écoles américaines entre 1995 et 2001, Mark Leary, alors à l'université Wake Forest, aux États-Unis, et ses collègues ont montré que plus de 85% des auteurs de ces fusillades avaient subi un rejet répété des autres élèves. De nombreux travaux

criminologiques suggèrent que le sentiment d'exclusion représente l'un des facteurs de risque les plus couramment associés à la violence extrême, et ce bien davantage que l'appartenance à un gang délinquant, la précarité économique ou l'usage de drogue.

Par ailleurs, ce rejet contribue à ce que les enfants agressifs s'apparient davantage avec d'autres qui leur ressemblent, ce qui amplifie leurs dispositions par des effets de socialisation. James Snyder, de l'université d'État de Wichita, aux États-Unis, et ses collègues ont ainsi montré en 2005 qu'à l'école maternelle



# Le sentiment d'exclusion est l'un des facteurs de risque les plus couramment associés à la violence extrême

l'association à des pairs ayant des conduites agressives augmentait l'agressivité des enfants dans la classe et dans la cour de récréation pendant deux années consécutives.

On peut identifier deux processus d'influence des pairs. Tout d'abord, les groupes de pairs délinquants se forment sur la base d'un principe général d'homophilie: les interactions avec des personnes partageant certaines similitudes sont favorisées, ce qui conduit les personnes agressives à s'associer. Par ailleurs, le groupe fournit un cadre où se transmettent des normes proagressives, ainsi que les conditions de réalisation de conduites agressives. La violence est donc apprise et stimulée au contact des pairs délinquants, comme l'attestent plusieurs recherches longitudinales. Par exemple, en 2004, une étude américaine sur quelque 800 jeunes de Pittsburgh a montré qu'après leur entrée dans une bande, les nouveaux membres intensifiaient leur violence et les atteintes à la propriété. Un retour au niveau initial était observé lorsque les adolescents quittaient la bande.

De fait, dès 1996, une métaanalyse agrégeant 131 études indépendantes publiées entre 1970 et juin 1994 et totalisant plus de 700000 participants, réalisée par une équipe canadienne autour de Paul Gendreau, de l'université du Nouveau-Brunswick, a révélé que

parmi un ensemble de variables démographiques, familiales et personnelles, l'inclusion dans un réseau d'amis impliqués dans des activités criminelles était l'un des prédicteurs statistiques les plus robustes de la criminalité adulte, aux côtés de l'expression d'attitudes ou de cognitions antisociales, le diagnostic de personnalité antisociale, et un parcours délinquant durant l'enfance ou l'adolescence. Les facteurs socioéconomiques de la famille d'origine arrivaient en second plan.

## DES VARIABLES FAMILIALES

La famille représente néanmoins un environnement relié à l'agression de deux manières. Premièrement, le cadre familial constitue la matrice principale du développement émotionnel de l'enfant. Les caractéristiques des échanges quotidiens entre les membres de la famille ont donc un effet important sur le sentiment de sécurité et les capacités relationnelles des enfants. Une étude que nous avons menée en 2016 en France avec le sociologue Sebastian Roché auprès de plus de 12 500 adolescents indique que ceux qui avaient une relation non gratifiante avec leur mère portaient plus fréquemment une arme sur eux, indépendamment de nombreux facteurs socioéconomiques. Des relations plus détériorées avec les parents sont également liées à la pratique d'actes de cruauté sur les animaux, comme je l'ai observé en 2020 sur un autre échantillon de 12 000 adolescents.

Ces observations ne sont d'ailleurs pas spécifiques au contexte occidental. Une étude réalisée dans 60 sociétés différentes a en effet montré que les enfants rejetés par leurs parents se révélaient plus hostiles et agressifs que les autres.

Deuxièmement, la famille représente un lieu d'apprentissage possible de la violence comme auteur ou victime. La valorisation ou la désapprobation de la violence par les parents façonne considérablement les conduites quotidiennes de leurs enfants.

Ces deux types d'influence développementale sont centraux, mais n'épuisent pas l'ensemble des explications susceptibles de rendre compte des liens entre la famille et l'agression. Tout d'abord, il existe une continuité générationnelle dans l'exposition à de multiples facteurs de risque, comme des substances dangereuses présentes dans le logement familial et ayant une incidence sur le fonctionnement cognitif, voire sur le comportement.

Ainsi, en 1996, une équipe de l'université de Pittsburgh a mis en évidence, dans une cohorte de 850 garçons à l'école primaire, une corrélation entre la quantité de plomb détecté dans les os et le risque de développer un comportement antisocial et délinquant. Et en 2001,

une étude allemande sur 171 enfants nés entre 1993 et 1995, et suivis jusqu'à 42 mois, a montré que le développement cognitif et moteur durant cette période de l'enfance est inversement corrélé à la concentration de polychlorobiphényles dans le lait maternel.

Massivement utilisés jusque dans les années 1970, notamment comme fluides diélectriques dans divers équipements, ces composés ne sont plus produits ni utilisés en France depuis 1987. Classés parmi les polluants organiques persistants, ils restent cependant très présents dans le sol et les produits alimentaires d'origine animale.

L'exposition prénatale aux hydrocarbures aromatiques polycycliques, des polluants atmosphériques, affecte aussi le développement cognitif des enfants à 5 ans, comme l'attestent deux études sur des cohortes d'enfants suivis depuis leur gestation, dans les années 2000, l'une en Pologne et l'autre à New York.

Les facteurs de risque auxquels les enfants sont exposés chez eux ne sont pas que chimiques : pauvreté, ressources limitées, violences, éclatement familial, trafic, usage parental de substances sont autant d'éléments susceptibles de favoriser la transmission intergénérationnelle de l'agression. Sans compter le critère de similitude qui, souvent, intervient dans la formation des couples, ce qui peut amplifier les dispositions agressives.

Par ailleurs, les membres d'une même famille s'influencent mutuellement : un frère ou un parent constituent des modèles d'apprentissage permanents. En outre, les méthodes et l'implication éducative des parents peuvent favoriser le développement de la violence.

C'est ce que nous avons observé en 2005 avec Sebastian Roché, dans un échantillon de 1 129 enfants de Grenoble et Saint-Étienne âgés de 13 à 18 ans, dont la moitié étaient des aînés et l'autre moitié au milieu de la fratrie. Les méthodes disciplinaires des parents, comme l'usage de châtiments corporels ou l'incohérence éducative, étaient liées à un



### TRIBUNES DU MUSÉUM

LAURENT BÈGUE-SHANKLAND  
interviendra le samedi  
4 décembre après-midi lors  
de la Tribune **Histoire naturelle  
de la violence** du Muséum  
national d'histoire naturelle,  
à Paris.

Événement gratuit,  
informations sur  
[mnhn.fr/tribunes-violence](http://mnhn.fr/tribunes-violence)



# Les enfants rejetés par leurs parents se révèlent plus hostiles et agressifs que les autres







comportement agressif. De plus, une faible supervision parentale constituait un facteur de risque pour l'agression et la délinquance. La supervision parentale ne s'exerçait pas de manière indifférenciée: elle se focalisait davantage sur l'aîné que sur les puînés, diminuait avec le nombre d'enfants et était plus élevée pour les filles, ce qui est compatible avec les observations montrant que les aînés, les enfants de fratries moins nombreuses et les filles sont généralement moins enclins à l'agression.

En outre, des facteurs socioéconomiques déterminaient en partie la qualité de la supervision parentale: le chômage de longue durée ou l'exclusion sociale constituent ainsi des facteurs de risques affaiblissant significativement les compétences parentales.

## DES MESURES PRÉVENTIVES

Quel que soit le registre explicatif privilégié, la question de son rôle dans l'inspiration de la prévention des conduites agressives soulève des questions complexes. Certains craignent en effet qu'en cherchant à détecter les troubles précoces du comportement, l'on risque de désigner ensuite des enfants à problèmes et de procéder à une forme de stigmatisation qui irait à l'inverse des buts visés. Cependant, si l'on considère que les conduites agressives sont un marqueur de difficulté sociale, souvent lié à d'autres fragilités, il est utile de les prendre en compte afin de développer des compétences cognitives et émotionnelles chez les enfants, qui semblent gagner à

**La famille est un lieu d'apprentissage possible de la violence, notamment à travers les modèles que donnent les parents.**

les renforcer au moyen de programmes d'intervention validés scientifiquement.

Appliqué sous une forme pilote en Isère, le programme européen Unplugged a pour objectif de développer les compétences psychosociales afin de diminuer les risques de comportements susceptibles de compromettre la trajectoire sociale des adolescents. Ce programme, qui vise en particulier à prévenir l'usage de substances psychoactives, comporte également des volets dédiés aux relations avec les autres. Il se déroule sur le temps scolaire à un rythme souvent hebdomadaire pendant un trimestre, implique des enseignants qui y sont préalablement formés et concerne tous les élèves. Son objectif est de permettre aux enfants de cinquième et de quatrième de développer leurs «compétences de vie», notamment la capacité à s'affirmer et à s'intégrer à un groupe, à décoder les émotions et à trouver des moyens de surmonter les expériences de stress. Il a déjà fait ses preuves dans plusieurs pays, dont l'Allemagne et la Suède.

Mais les approches plus ciblées ne sont pas à écarter pour autant. Les travaux menés par le Canadien Richard Tremblay ont montré que des interventions psychoéducatives intensives et de qualité qui visent les enfants en forte difficulté dès la grande section de maternelle leur sont utiles et n'ont pas les effets stigmatisants que l'on aurait pu redouter. Apprendre à interpréter les intentions d'autrui, à atténuer sa frustration par des techniques de diminution du stress ou à communiquer ses besoins de manière affirmative, mais sans violence, est possible. ■

## BIBLIOGRAPHIE

L. Bègue, **Explaining animal abuse among adolescents : The role of speciesism**, *J. Interpers. Violence*, en ligne le 24 septembre 2020.

L. Bègue, **L'Agression humaine**, Dunod, 2015.

R. Tremblay, **Prévenir la violence dès la petite enfance**, Odile Jacob, 2008.

# R

## ENDEZ-VOUS

P.80 Logique & calcul  
 P.86 Art & science  
 P.88 Idées de physique  
 P.92 Chroniques de l'évolution  
 P.96 Science & gastronomie  
 P.98 À picorer

# PAS SI SIMPLE, L'ESPÉRANCE DE VIE!

L'espérance de vie publiée par les statisticiens indique-t-elle combien de temps en moyenne il nous reste à vivre? Non, car les calculs reposent sur les statistiques passées, qui ne se reproduiront pas nécessairement...

### L'AUTEUR



**JEAN-PAUL DELAHAYE**  
 professeur émérite  
 à l'université de Lille  
 et chercheur au  
 laboratoire Cristal  
 (Centre de recherche  
 en informatique, signal  
 et automatique de Lille)



Jean-Paul Delahaye a notamment publié : **Les Mathématiciens se plient au jeu**, une sélection de ses chroniques parues dans *Pour la Science* (Belin, 2017).

L'espérance de vie est un concept statistique intéressant... et mal compris. Il n'est pas vrai par exemple que si l'espérance de vie à la naissance en France publiée par l'Insee dans ses tableaux 2020 de l'économie française (voir la bibliographie) est de 85,6 ans pour les femmes, cela signifie que les femmes nées en France en 2020 vivront en moyenne 85,6 ans. Le sens des données publiées est plus subtil!

### L'ESPÉRANCE MATHÉMATIQUE

Voyons sur un exemple ce que signifie l'«espérance mathématique». Imaginons que vous lancez un dé et que cela vous rapporte en euros le résultat du lancer: 1 euro si le 1 sort, 2 euros si le 2 sort, etc. Combien gagnez-vous par lancer en moyenne?

C'est facile: une fois sur six vous gagnerez 1 euro, une fois sur six, 2 euros, etc. Comme les chances de chaque résultat sont égales, vous gagnerez la moyenne de leurs valeurs, soit  $(1+2+3+4+5+6)/6 = 21/6 = 3,5$  euros, calcul que l'on peut voir comme la moyenne des sommes gagnées pondérées par leurs probabilités:  $(1 \times 1/6) + (2 \times 1/6) + (3 \times 1/6) + (4 \times 1/6) + (5 \times 1/6) + (6 \times 1/6) = 21/6 = 3,5$  euros. Ce sera votre espérance de gain à chaque lancer de dé.

Imaginons maintenant que le dé est truqué: le 6 tombe une fois sur deux, et le 1, le 2, le 3, le 4 et le 5 tombent chacun une fois sur dix. Le total des probabilités est bien égal à 1:

$1/10 + 1/10 + 1/10 + 1/10 + 1/10 + 1/2 = 1$ , tout va bien. Votre gain moyen au jeu envisagé plus haut est toujours la moyenne des sommes gagnées en les pondérant par leurs probabilités, ce qui donne:  $(1 \times 1/10) + (2 \times 1/10) + (3 \times 1/10) + (4 \times 1/10) + (5 \times 1/10) + (6 \times 1/2) = 4,5$  euros. Le dé truqué vous fera gagner en moyenne 1 euro de plus par lancer que le dé équilibré.

Ainsi, l'espérance pour une variable aléatoire (ici le résultat du lancer d'un dé) est la valeur moyenne obtenue en multipliant les valeurs possibles par les probabilités d'avoir ces valeurs. L'espérance de vie à la naissance pour une catégorie de personnes, par exemple celles nées en 2001, est la moyenne des âges de décès de ces personnes, pondérés par leurs probabilités respectives, c'est-à-dire par la fréquence mesurée de chacun de ces âges de décès. C'est l'«espérance de vie réelle» ( $EV_R$ ). Or ce n'est pas cela que les statisticiens appellent l'«espérance de vie»!

### INACCESSIBLE ESPÉRANCE DE VIE RÉELLE

On ignore en effet à quel âge mourront les gens qui naissent cette année. L'espérance de vie réelle à la naissance pour la catégorie de personnes nées durant l'année  $N$  n'est calculable qu'un siècle environ après l'année  $N$ . Sauf pour les générations très anciennes, par exemple les Français nés en 1910, elle ne peut



pas être déterminée. On aimerait quand même avoir une idée de cette espérance de vie, y compris pour les gens nés en 2021 ou en 1990! Comment tirer parti des statistiques passées?

Une première idée serait de calculer l'âge moyen de décès (AMD), durant l'année  $N$ , des personnes auxquelles on s'intéresse, par exemple les Françaises durant l'année 2021. Si la structure des âges et les taux de mortalité dans la population étudiée étaient constants dans le temps, cette méthode serait satisfaisante. Ce n'est pas le cas.

L'idée du calcul de l'Insee et des statisticiens dans tous les pays est plus subtile: ils calculent les taux de mortalité par âge à partir des données les plus récentes disponibles (celle de 2019 par exemple), puis ils imaginent une population fictive qui évolue d'année en année en subissant ce taux de mortalité pour chaque âge. Les enfants de moins d'un an de cette population fictive meurent en proportion comme l'indique le taux de mortalité pour 2019 des enfants de moins d'un an; puis les enfants ayant survécu à leur première année meurent dans leur seconde année avec le taux de mortalité pour 2019 des enfants âgés entre un et deux ans, etc. L'espérance de vie mathématique pour cette population fictive est alors facile à calculer: c'est la moyenne des âges de décès pondérés par les effectifs associés. Le résultat de ce calcul est ce que les statisticiens publient, et nous le nommerons «espérance de vie des statisticiens» ( $EV_s$ ).

Résumons: l'espérance de vie réelle ( $EV_r$ ) fondée sur la notion mathématique d'espérance (comme pour les dés) n'est calculable que pour les générations anciennes, aussi on la remplace par le calcul de  $EV_s$ , qui se fonde chaque année sur les chiffres des statistiques de décès de la dernière année pour laquelle on en dispose, en imaginant une génération fictive respectant ces taux de mortalité. Les encadrés 1 et 2 donnent des exemples montrant numériquement les différences entre  $EV_r$  et  $EV_s$ . Cela étant, quels risques prend-on en calculant  $EV_s$  à la place de  $EV_r$ ?

## POPULATIONS IMAGINAIRES, MAIS POSSIBLES

L'espérance de vie à la naissance n'est pas l'information qui vous concerne le plus, c'est plutôt «l'espérance de vie à l'âge  $A$ », quand vous avez l'âge  $A$ .

Dans le cas de  $EV_r$ , ce sera l'espérance au sens mathématique du nombre d'années de vie restant à vivre pour une personne d'âge  $A$ , en se référant aux chiffres réels des décès de gens ayant l'âge  $A$  à la date à laquelle on s'intéresse (par exemple  $N = 1880$ ), qui ne sont connus que progressivement quand les années passent.



## ESPÉRANCE DE VIE ET ÂGE MOYEN DE DÉCÈS

L'espérance de vie réelle ( $EV_r$ ), l'espérance de vie des statisticiens ( $EV_s$ ) et l'âge moyen de décès (AMD) sont différents. Imaginons un élevage animal dont les effectifs par âge aux 1<sup>er</sup> janvier 1900, 1901, 1902 et 1903 sont donnés par le tableau :

Âge (ans)	0	1	2	3	4
Effectif 1900	100	100	100	100	0
Effectif 1901	200	80	60	50	0
Effectif 1902	300	170	56	30	0
Effectif 1903	400	270	136	28	0

On en déduit les taux de décès par âge (TCA) chaque année :

Âge (ans)	0	1	2	3
TCA en 1900	20%	40%	50%	100%
TCA en 1901	15%	30%	50%	100%
TCA en 1902	10%	20%	50%	100%

Nous avons supposé que le nombre de naissances augmentait globalement, ce qui se produit en général pour les populations humaines. Ici, pour un élevage, ce nombre passe de 100 à 400. Nous avons aussi supposé que les taux de mortalité étaient chaque année croissants en fonction de l'âge, mais que, d'une année à la suivante, ils décroissaient avec les progrès dans les soins apportés aux animaux de l'élevage. Pour les humains, il y a aussi une augmentation des taux de mortalité avec l'âge et une baisse de ces taux d'année en année avec les progrès de la médecine et de l'hygiène.

### Espérance de vie $EV_r$ à la naissance pour les animaux d'âge 0 en 1900

Parmi les 100 individus nés en 1900, 20 sont morts avant d'atteindre l'âge de 1 an, 24 sont morts dans leur seconde année, c'est-à-dire quand ils avaient 1 an, 28 sont morts quand ils avaient 2 ans, et 28 quand ils avaient 3 ans. L'espérance de vie pour cette cohorte née en 1900 est donc :  $EV_r = 0 \times 20/100 + 1 \times 24/100 + 2 \times 28/100 + 3 \times 28/100 = 1,64$  an. Pour la connaître, il faut attendre la

mort de tous les animaux concernés, mais c'est la véritable espérance de vie : la moyenne des âges de décès pondérés par les probabilités de chacun de ces âges de décès.

### Espérance de vie $EV_s$ à la naissance pour les animaux d'âge 0 en 1900 évaluée à partir des taux de mortalité de 1900

Si nous calculions l'espérance de vie des animaux de l'élevage à la fin de l'année 1900, nous devrions utiliser les taux de mortalité pour l'année 1900. C'est la situation des statisticiens qui, en 2021, veulent calculer l'espérance de vie des enfants qui viennent de naître en ne disposant que des données de 2020 ou même de 2019. Pour l'élevage, le statisticien fait l'hypothèse que les taux de mortalité de 1900 seront valides tout au long de la vie des animaux nés en 1900.

Les taux de mortalité en fonction de l'âge en 1900 sont 20 %, 40 %, 50 %, 100 %. La population fictive imaginée par le statisticien pour le calcul de l'espérance de vie passera donc de 100 individus à 80 entre 1900 et 1901, puis de 80 à 48 entre 1901 et 1902, puis de 48 à 24 entre 1902 et 1903, puis disparaîtra. Cela donne :  $EV_s = 0 \times 20/100 + 1 \times 32/100 + 2 \times 24/100 + 3 \times 24/100 = 1,52$  an. L'espérance de vie du statisticien ( $EV_s$ ) est inférieure à la réalité ( $EV_r$ ), car le statisticien, avec les données de 1900, a surestimé les taux de mortalité, qui, grâce au progrès de l'élevage, ont diminué d'année en année.

### Âge moyen de décès en 1900

Il y a eu 210 morts en 1900, et l'âge moyen des animaux décédés (AMD) est :  $AMD = 0 \times 20/210 + 1 \times 40/210 + 2 \times 50/210 + 3 \times 100/210 = 2,09$  ans. Cet âge est encore plus élevé que  $EV_r$ , car les données pour 1900 contiennent trop d'animaux âgés, ce qui se corrige pour 1901, 1902 et 1903. Un plus grand nombre de sujets âgés augmente l'âge moyen de décès, comme un plus grand nombre de jeunes le ferait décroître : l'âge moyen de décès ne donne pas l'espérance de vie...

Dans le cas de  $EV_s$ , ce sera en se référant à la population fictive construite à partir des taux de mortalité les plus récents disponibles, par exemple ceux de l'année  $N-1$ .

Dans certains pays pauvres, un grand nombre de décès se produisent lors des premières années de vie. Ces morts prématurées influent beaucoup sur l'espérance de vie à la naissance, qui sera assez faible dans un tel cas. Il est assez clair que si, pour une population donnée, les taux de mortalité des premières années sont mauvais et qu'au-delà ils sont convenables, l'effet des mauvaises années sur l'espérance de vie à l'âge  $A$  au-delà des mauvaises années sera nul. C'est ce que l'on observe sur les courbes  $EV_b$  et  $EV_c$  de l'encadré 3.

Les cinq courbes du graphique B de l'encadré 3 indiquent l'espérance de vie à l'âge  $A$  pour cinq populations différentes déduites des données de l'Insee pour 2019 en jouant sur certaines hypothèses.

La première population envisagée est celle correspondant à la population fictive que les statisticiens imaginent à partir des données de mortalité des Français en 2019 calculées par l'Insee. C'est donc l'espérance de vie des statisticiens  $EV_s$ . Cela donne la courbe  $EV_a$  d'espérance de vie à l'âge  $A$ , en fonction de  $A$ . Les données indiquent que  $EV_a$  à la naissance est 82,3 ans. À 20 ans, l'espérance de vie est 62,8 (ce qui fait un âge espéré de décès de 82,8 ans).

La seconde population envisagée est une population fictive qui protégerait mal la vie de

ses jeunes. Elle est obtenue en multipliant par 20, pour les trente premières années, les taux de mortalité de la première population. Nous la notons  $EV_b$ . Le but des calculs est de voir l'effet sur l'espérance de vie de ces taux de mortalité importants chez les jeunes.

L'espérance de vie à la naissance est passée de 82,3 à 69 ans. Celle à 20 ans est passée de 62,8 à 58. Celle à 30 ans est en revanche, comme précédemment, de 53,1 ans. C'est normal, puisque au-delà de 30 ans, nous avons utilisé les mêmes taux de mortalité que pour la courbe  $EV_a$ ; or l'espérance de vie à l'âge  $A$  ne dépend que des taux de mortalité au-delà de l'âge  $A$ . Cela explique la coïncidence de  $EV_a$  avec  $EV_b$  à partir de 30 ans.

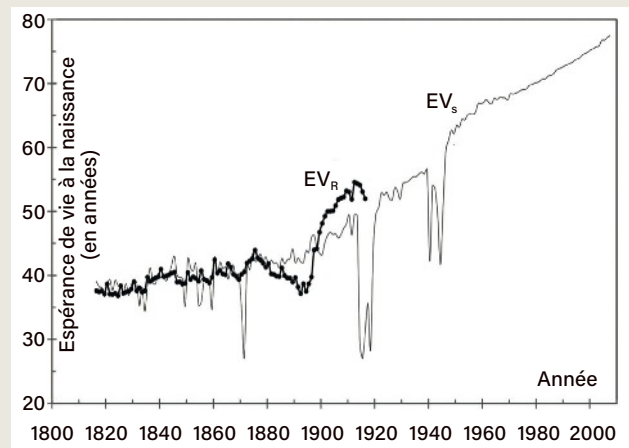
La troisième population explore encore le problème de la mortalité infantile. Cette fois, on remplace les taux de mortalité par  $1/20$  pour les vingt premières années. La courbe obtenue est  $EV_c$ . L'espérance de vie à la naissance est maintenant passée à 34,7 ans, mais bien sûr à partir de 20 ans les courbes  $EV_a$  et  $EV_c$  coïncident.

Il semble logique que le nombre d'années qu'il vous reste à vivre diminue avec l'âge et c'est ce qu'on observe presque tout le temps: les courbes sont le plus souvent décroissantes. Cependant, même si cela semble paradoxal, quand le taux de mortalité est très élevé à certains âges, il se produit un renversement: l'espérance de vie augmente avec l'âge. C'est ce que l'on observe sur les courbes  $EV_b$  et  $EV_c$ . C'est

# 2

## ESPÉRANCES DE VIE RÉELLE ET ANTICIPÉE

La courbe en trait épais représente l'espérance de vie réelle ( $EV_r$ ) à la naissance pour les hommes en France, en faisant le calcul pour les générations nées entre 1816 et 1916 (et pour lesquelles le calcul est possible). La courbe en trait fin est l'espérance de vie à la naissance calculée par les statisticiens ( $EV_s$ ) en n'utilisant que les données des taux de mortalité de l'année pour chacune des années de 1816 à 2007. On observe que les courbes, quand on peut calculer à la fois  $EV_s$  et  $EV_r$ , sont assez différentes. Le creux profond de  $EV_s$  vers 1915 correspond à la Première Guerre mondiale: les taux de mortalité élevés pour les classes d'âge participant aux combats créent pour le statisticien une population fictive (qui lui sert à calculer  $EV_s$ ) largement défavorisée,



comparée à la réalité de l'espérance de vie ( $EV_r$ ) des enfants nés aux mêmes dates. Vers 1890, la courbe  $EV_r$  est sous la courbe  $EV_s$ , et c'est aussi un effet de la guerre: en effet, les générations autour

de 1890 ont été largement victimes de la guerre (ce que  $EV_r$  prend en compte), alors que  $EV_s$ , qui n'est fondée que sur les taux de mortalité de l'année même, donc vers 1890, n'en tient pas compte.



# 3

## POPULATIONS FICTIVES

Le tableau **A** ci-contre montre les taux de mortalité par millier d'habitants de l'année 2019 en France pour les hommes, pour les femmes et pour les deux regroupés. Par exemple, chez les individus âgés de 25 à 29 ans, le taux de mortalité des femmes est de 2 sur 10 000, celui des hommes de 7 sur 10 000 et, compte tenu des populations de femmes et d'hommes (non indiquées), le total, c'est-à-dire la moyenne pondérée, est de 5 sur 10 000. Ce sont les taux utilisés pour les graphiques **B** et **C** (<https://www.ined.fr/fr/tout-savoir-population/chiffres/france/mortalite-cause-deces/taux-mortalite-sexe-age/>).

### L'espérance de vie de cinq populations imaginaires (B)

La courbe  $EV_a$  correspond à ce que nous avons appelé « espérance de vie des statisticiens »  $EV_s$  pour 2020, qui est l'espérance de vie à l'âge  $A$  pour les membres d'une population imaginaire POP obtenue en supposant que les taux de mortalité de 2019 donnés dans le tableau resteront identiques dans les années à venir.

La courbe  $EV_b$  est la courbe des espérances de vie à l'âge  $A$  d'un pays imaginaire où, pendant les trente premières années de vie, les taux de mortalité sont multipliés par 20 par rapport à POP, puis sont identiques à ceux de POP.

La courbe  $EV_c$  est celle d'un pays imaginaire où pendant les vingt premières années les taux de mortalité valent 1/20, puis sont identiques à ceux de POP.

La courbe  $EV_d$  est la courbe qui sera la vraie courbe des espérances de vie à l'âge  $A$  ( $EV_R$ ), si les progrès de la médecine permettent chaque année de diminuer les taux de mortalité de POP de 1 % dans chaque tranche d'âge.

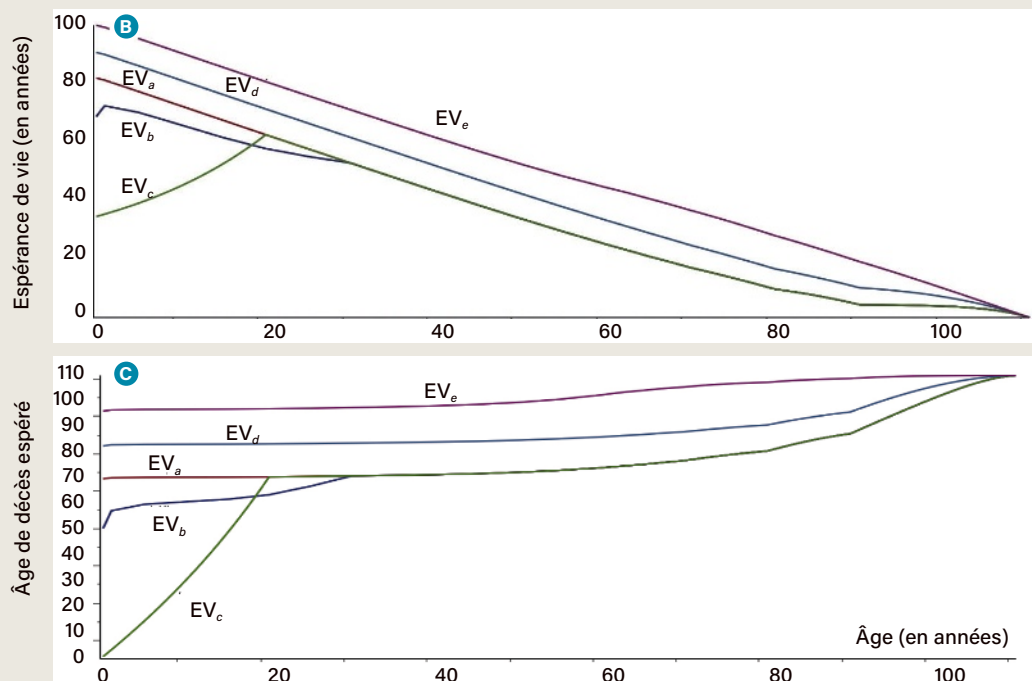
La courbe  $EV_e$  est la courbe qui sera la vraie courbe des espérances de vie à l'âge  $A$ , si les progrès de la médecine permettent chaque année qui vient de diminuer les taux de mortalité de POP de 10 % dans les tranches d'âge à partir de 60 ans (voir le texte).

**A** Taux de mortalité par sexe et âge en 2019

	Total	Hommes	Femmes
Tous âges	9,2	9,4	9,0
moins de 1 an	3,2	3,5	2,8
1 à 4 ans	0,3	0,3	0,2
5 à 9 ans	0,1	0,1	0,1
10 à 14 ans	0,1	0,1	0,1
15 à 19 ans	0,2	0,3	0,1
20 à 24 ans	0,4	0,6	0,2
25 à 29 ans	0,5	0,7	0,2
30 à 34 ans	0,6	0,8	0,3
35 à 39 ans	0,8	1,1	0,5
40 à 44 ans	1,2	1,6	0,8
45 à 49 ans	2,0	2,6	1,4
50 à 54 ans	3,2	4,2	2,3
55 à 59 ans	4,9	6,5	3,3
60 à 64 ans	7,5	10,4	4,9
65 à 69 ans	10,6	14,8	6,9
70 à 79 ans	18,1	24,5	12,7
80 à 89 ans	57,3	72,0	47,9
90 à 110 ans	183,0	215,0	172,0

### La durée de vie espérée pour cinq populations imaginaires (C)

En additionnant l'âge  $A$  et l'espérance de vie à l'âge  $A$ , on obtient les « âges de décès espérés », qui sont représentés pour les cinq populations envisagées dans la section précédente. Ces âges calculés à partir des taux de mortalité d'une année fixée sont nécessairement croissants. Dans les populations envisagées par nos calculs, nous n'avons pas considéré possible de dépasser 110 ans. C'est pourquoi toutes les courbes sont croissantes jusqu'à 110 ans : plus on s'approche de 110 ans, plus l'âge espéré du décès est proche de 110 ans.



aussi ce qui se produirait si le taux de mortalité pour un âge donné  $A$  (par exemple 40 ans) était très élevé (par exemple 90%) : l'espérance de vie  $EV_s$  à l'âge  $A+1$  augmenterait brutalement par rapport à ce qu'elle est avant  $A$ .

Pour la quatrième population, on a imaginé que les progrès généraux de santé publique font baisser les taux de mortalité de 1% chaque année pour toutes les classes d'âge. Si c'est effectivement ce qui se produit, alors la courbe des espérances de vie obtenue,  $EV_d$ , est celle véritable qu'on trouvera dans un siècle pour la cohorte de 2019 quand on pourra la calculer; autrement dit, c'est peut-être l'espérance de vie réelle,  $EV_R$ , celle qui concerne chacun de nous.

On voit que l'espérance de vie à la naissance est maintenant passée à 91,1 ans et que, quel que soit l'âge considéré, environ 8 ans ont été gagnés! Cette possible espérance de vie est donc assez supérieure à celle que proposent les statisticiens ( $EV_a$ ). Cependant, si, pour des raisons imprévisibles aujourd'hui, les taux de mortalité des années à venir étaient non pas en baisse mais croissants, la vraie

espérance de vie pour l'année 2021 ( $EV_R$ ) pourrait être inférieure à celle que proposent les statisticiens ( $EV_a$ ) et non pas supérieure comme le modélise  $EV_d$ .

Pour la cinquième population, on a supposé que les progrès en matière de santé portaient uniquement sur la fin de vie et qu'ils étaient de 10% par an à partir de 60 ans... ce qui est sans doute excessivement optimiste. Cette fois, l'espérance de vie à la naissance est de 100,4 ans!

## LES EFFETS DU COVID-19

Le monde réel nous a réservé une mauvaise surprise, et évidemment les taux de mortalité en 2020 et 2021 ont, à cause du Covid-19, augmenté comparés à ceux de 2019. Il s'ensuit que les modèles envisagés ci-dessus sont probablement trop optimistes et que nous trouverons des courbes plus basses en refaisant les calculs avec les données définitives de 2020 ou de 2021. En revanche, même si cela peut sembler paradoxal, une fois l'épidémie maîtrisée, les chiffres retrouveront le même niveau qu'en 2019, et seront même supérieurs à ceux calculés à partir des données de 2019.

La raison est assez navrante, mais les statisticiens doivent prendre en considération le raisonnement suivant. Ceux qui sont morts en 2020 et 2021 étaient souvent les plus fragiles de leur catégorie d'âge, et donc ceux qui, dans une catégorie d'âge, ont passé le cap de la pandémie seront en moyenne plus robustes pour le même âge que ne l'étaient avant 2020 ceux de leur catégorie. La pandémie a rendu la population légèrement plus robuste, et donc les taux de mortalité pour 2022 et au-delà (si la pandémie est maîtrisée) seront meilleurs que s'il n'y avait pas eu de pandémie. L'espérance de vie  $EV_s$  sera donc en augmentation pour un certain temps à partir de 2022, et cela indépendamment de tout progrès des systèmes de santé.

## LE PARADOXE DE 2015

Une baisse de l'espérance de vie ( $EV_s$ ) a été notée en 2015 dans plusieurs pays européens: France, Grande-Bretagne, Belgique et Pays-Bas. On a cherché une explication à ce qui apparaissait dans un premier temps comme une baisse de la santé générale des populations concernées, voire une crise de santé publique. Rien n'expliquait totalement le phénomène, pas même la grippe un peu plus forte que la moyenne en 2015.

Marc Luy, du centre Wittgenstein de démographie et de capital humain, à Vienne, et une équipe de chercheurs autour de lui ont proposé une explication du paradoxe. Elle est liée à cet effet des changements de mortalité d'une année sur les suivantes, qui provoquent sans cause réelle d'autres changements un peu plus tard de  $EV_s$ .

# 4

## L'IMPACT D'UNE ÉPIDÉMIE OU DES DÉMÉNAGEMENTS

Comme l'espérance de vie des statisticiens,  $EV_s$ , le taux général de décès (nombre de décès l'année  $N$  divisé par la population totale de l'année  $N$ ) et l'âge moyen des décès (moyenne de tous les âges des personnes décédées l'année  $N$ ) ont parfois des évolutions contraires à l'intuition.

### Paradoxe de l'épidémie

La survenue d'une épidémie ne fait pas nécessairement baisser l'espérance de vie. Quand une épidémie a sévi et tué principalement des personnes âgées (par exemple au-delà de 50 ans), une fois qu'elle est passée, le taux général de décès et l'âge moyen de décès baissent, car les plus jeunes, qui meurent moins même quand il n'y a pas d'épidémie, sont alors en plus grande proportion. Malgré cela, quand une épidémie est passée, l'espérance de vie à la naissance  $EV_s$  peut reprendre les valeurs qu'elle avait avant, car  $EV_s$  est calculée en fonction des taux de mortalité par classe d'âge qui peuvent très bien avoir exactement repris les valeurs d'avant l'épidémie. Il se peut même que  $EV_s$  augmente si l'épidémie a tué plus particulièrement les

personnes les plus fragiles, rendant les classes d'âge qui survivent plus robustes : c'est l'« effet de moisson » (voir le texte).

### Paradoxe du déménagement

Quand des séniors arrivent dans une région, cela fait monter l'espérance de vie ! Quand des personnes âgées favorisées déménagent et s'installent dans une région au climat plus clément pour y passer leurs vieux jours, le taux général de décès dans la région où ils s'installent augmente, car la population comporte alors une plus grande proportion de personnes âgées. Cependant, l'espérance de vie ( $EV_s$ ) augmente aussi, car les personnes favorisées ont de plus faibles taux de mortalité par âge, et donc les taux de mortalité par âge diminuent pour les âges avancés, ce qui accroît  $EV_s$  : il y a plus de morts, mais l'espérance de vie augmente ! Inversement, quand des personnes favorisées âgées s'en vont de leur région, cela a pour effet de diminuer le taux général de mortalité, et l'âge moyen de décès, pourtant cela fera aussi baisser l'espérance de vie !



L'explication proposée est la suivante. En 2014, la mortalité due à la grippe a été particulièrement faible, et donc une partie de la population qui habituellement aurait été victime de la grippe est restée vivante en 2015. Outre la baisse de mortalité et donc une augmentation de  $EV_s$  pour 2014 dont tout le monde s'est réjoui, il s'est ensuivi une baisse globale de la robustesse de la population qui abordait l'année 2015. Cette baisse expliquerait au moins en partie la baisse d'espérance de vie notée en 2015, qui ne serait donc pas liée à un affaiblissement réel des systèmes de santé des pays concernés, ni totalement à la grippe de 2015. Il s'agirait simplement d'un effet numérique différé lié à la méthode de calcul de l'espérance de vie des statisticiens ( $EV_s$ ), dont il faut attendre qu'il produise aussi une illusoire augmentation de l'espérance de vie en 2022 et au-delà... si l'épidémie de Covid-19 est maîtrisée.

Les démographes utilisent à ce sujet le terme d'« effet de récolte » ou « effet de moisson ». Par exemple, plusieurs études ont montré que les hivers à forte mortalité, comparés à ceux à faible mortalité, entraînent, par cet effet de moisson, une réduction des conséquences des vagues de chaleur estivale qui les suivent.

## UN CAS GRAVEMENT PARADOXAL

Un exemple un peu artificiel montre que le calcul de  $EV_s$  pour évaluer  $EV_R$  est susceptible de produire des aberrations. Imaginons une population stabilisée où l'espérance de vie est par exemple de 80 ans. La population étant stabilisée, l'espérance de vie réelle ( $EV_R$ ) est égale à l'espérance de vie des statisticiens ( $EV_s$ ) et même égale à l'âge moyen de décès d'une année quelconque (AMD).

Imaginons maintenant, toutes choses restant égales par ailleurs, que pour une cause malheureuse (guerre périodique, épidémie récurrente très ciblée, etc.), tous les dix ans lors des années multiples de 10 (2010, 2020, 2030...), la classe d'âge des 20 ans disparaît presque totalement, disons à 99,9%. L'égalité entre  $EV_R$ ,  $EV_s$ , et AMD ne persisterait pas, et des résultats paradoxaux surviendraient.

Pour les années  $N$  dont le chiffre des unités n'est pas un 1, le calcul de  $EV_s$  à l'âge  $A$  fondé sur les taux de mortalité de l'année  $N-1$  ne prendrait pas en compte l'hécatombe. Le calcul de  $EV_s$  resterait donc identique à ce qu'il était avant les hécatombes périodiques. En particulier, l'espérance de vie à la naissance serait toujours évaluée à 80 ans, y compris pour les générations condamnées à l'âge de 20 ans, dont la véritable espérance de vie serait inférieure à 20 ans !

Pire, pour une année qui suit l'hécatombe de la classe d'âge des 20 ans (les années dont le chiffre des unités est 1), l'espérance de vie du statisticien  $EV_s$  prendrait en compte le massacre qui vient de se produire et donc le taux de mortalité pour les 20 ans serait de 99,9%. Presque personne dans la population fictive du statisticien ne dépasserait donc l'âge de 20 ans. Il en résulterait que, pour tous les  $A$  inférieurs à 20, l'espérance de vie à l'âge  $A$  donnée par  $EV_s$  serait inférieure à 20 ans, y compris pour ceux qui n'appartiennent pas à une génération sacrifiée et dont la véritable espérance resterait 80 ans ! La population fictive des statisticiens les conduirait, encore plus que dans le premier cas, à se tromper gravement.

Dans un tel cas, l'espérance de vie réelle  $EV_R$  n'est pas erronée puisqu'elle est calculée après coup. Quant à l'âge moyen de décès, AMD calculé l'année  $N$ , il sous-évaluerait l'espérance de vie  $EV_R$  les années suivant une hécatombe et la surévaluerait les autres années. Elle se tromperait donc toujours, mais serait moins dans l'erreur que  $EV_s$  !

## LE PROBLÈME DES CATÉGORIES IMBRIQUÉES

Notons pour terminer un paradoxe plus général en statistique : celui des catégories imbriquées. Pour l'espérance de vie ( $EV_R$  ou  $EV_s$ ), on sait bien que les résultats pour les femmes sont meilleurs que ceux calculés quand on ne distingue pas les sexes et bien sûr ils sont moins bons encore pour les hommes. Ainsi, à partir d'une information sur le sexe, l'évaluation de l'espérance de vie est modifiée. Il en serait de même si l'on prenait en compte la région où vivent les gens. Ce serait le cas encore en prenant en compte la profession, ou plusieurs de ces données à la fois. À chaque information nouvelle sur la personne à laquelle on s'intéresse (soi-même, par exemple !) le calcul de l'espérance de vie change, en diminuant ou en augmentant selon les cas.

Ces informations ne sont pas inconnues, pourquoi s'interdire de les utiliser ? S'interdire de les utiliser rend certain d'avoir un résultat faux. Quand on veut connaître l'espérance de vie d'une personne, on se trouve donc dans la situation où on utilise des évaluations statistiques qui non seulement sont fausses du fait de la méthode (car on ne dispose que de  $EV_s$ ), mais qui sont fausses aussi parce qu'on dispose d'informations qu'on fait semblant d'ignorer. N'est-ce pas un peu paradoxal et cela ne signifie-t-il pas simplement qu'à titre individuel les statistiques d'espérance de vie sont sans intérêt, leur seule utilité étant de fournir une évaluation globale des systèmes de santé et cela à la condition de ne pas se faire piéger par l'effet de moisson ! ■

## BIBLIOGRAPHIE

M. Martin et É. Rignols (coord.), **Tableaux de l'économie française**, Insee, 2020 (<https://www.insee.fr/fr/statistiques/fichier/4318291/TEF2020.pdf>).

M. Luy *et al.*, **Life expectancy : frequently used, but hardly understood**, *Gerontology*, vol. 66(1), pp. 95-104, 2020.

M. Sauerberg *et al.*, **The cross-sectional average length of healthy life (HCAL) : a measure that summarizes the history of cohort health and mortality**, *Population Health Metrics*, vol. 18, article 21, 2020.

R. G. Rogers et E. M. Crimmins (éd.), **International Handbook of Adult Mortality**, Springer, 2011.

J. Goldstein et K. Wachter, **Relationships between period and cohort life expectancy : Gaps and lags**, *Population Studies*, vol. 60(3), pp. 257-269, 2006.

M. Guillot, **The cross-sectional average length of life (CAL) : A cross-sectional mortality measure that reflects the experience of cohorts**, *Population Studies*, vol. 57(1), pp. 41-54, 2003.

## L'AUTEUR



**LOÏC MANGIN**  
rédacteur en chef adjoint  
à Pour la Science

# L'ÂME DE L'ÉLÉPHANT

**Aux XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> siècles, à Versailles, la cour cohabitait avec des milliers d'animaux, exotiques ou non, auxquels elle accordait une place de choix. Au point de s'opposer à Descartes en leur attribuant intelligence et sensibilité.**

**L**e 8 juin 1637, à Leyde, aux Pays-Bas, paraît anonymement un ouvrage appelé à faire grand bruit : *Le Discours de la méthode*. L'objectif de l'auteur, René Descartes, est de reconstruire le savoir sur des fondements sûrs, inspirés du raisonnement mathématique. Dans la cinquième partie, le philosophe expose sa théorie des « animaux-machines » selon laquelle les animaux ne sont que des mécanismes n'agissant qu'en fonction de l'agencement de leurs rouages, en l'occurrence leurs organes. Seul l'humain disposerait d'une âme, d'une intelligence, de sentiments... Très tôt, la théorie cartésienne eut ses détracteurs, et un solide front d'opposition se dressa... à Versailles, sous le règne de Louis XIV à XVI.

Cette résistance saute aux yeux lors de la visite de l'exposition foisonnante « Les animaux du roi », qui se tient au château de Versailles. Plus largement, elle met en lumière la place privilégiée qu'occupaient des milliers d'animaux domestiques, de compagnie ou exotiques, dans l'environnement des monarques et de leur entourage : chiens, chevaux, singes, chats, coatis, couaggas, poules sultanes adorées de Louis XIV, flamants roses, pélicans, casoars, autruches... avaient leurs entrées à la cour !

Tous ne circulaient pas librement et beaucoup étaient hébergés dans une ménagerie édifiée entre 1662 et 1664, cette vitrine du prestige royal, scénographiée par Louis le Vau et détruite pendant la Révolution, étant partiellement reconstituée dans l'exposition.

Mazarin avait déjà fait construire une ménagerie à Vincennes, mais elle était dédiée aux combats d'animaux féroces. Rien de cela à Versailles, où les pensionnaires de ce que l'on peut voir comme le premier parc zoologique des temps modernes étaient pacifiques. Parmi eux vivait un éléphant...

L'animal était un cadeau du Portugal offert en 1668 au roi de France, Louis XIV. Né au Congo, vers 1664, il fut, jusqu'à son décès en 1681, la vedette de la ménagerie où il ne manquait de faire des siennes, notamment se libérer des courroies qui l'entravaient et sortir de sa loge pour semer la panique parmi les autres résidents. On raconte qu'il savait discerner les moqueries et s'en venger. Ainsi renversa-t-il de sa trompe un jeune homme







Éléphant du Congo vu de face, Pieter Boel (1622/1625-1674), pierre noire avec rehauts de pastel.

qui faisait semblant de lui jeter à manger et, pour les mêmes raisons, aspergea-t-il d'eau un peintre et son œuvre! À sa mort, le roi lui-même assista à la séance de dissection, menée par l'anatomiste Joseph Guichard du Verney sur place, à la différence des autres animaux qui étaient envoyés à Paris. On découvrit alors que l'éléphant était une femelle.

Le squelette et l'animal naturalisé sont présentés aux visiteurs, mais plus encore, en matière de témoignages, ce sont les portraits, dont celui réalisé par Pieter Boel (*voir la reproduction ci-dessus*), qui retiennent l'attention.

En effet, l'artiste, qui a passé beaucoup de temps à observer les attitudes naturelles de l'animal, s'attache à son expressivité en insistant sur son regard, son

comportement... En un mot, il fait du pachyderme un individu à la personnalité singulière. Ce faisant, il emboîte le pas à de nombreux membres de la cour fervents anticartésiens. Au médecin et architecte Claude Perrault, ajoutons la princesse Palatine, belle-sœur de Louis XIV, Claude Adrien Helvétius, maître d'hôtel ordinaire de la reine, Charles Georges Leroy, lieutenant des chasses royales... Ces deux derniers ont publié des ouvrages dans lesquels ils défendent énergiquement l'idée d'une intelligence animale.

Par exemple, Leroy, considéré comme un pionnier de l'éthologie et de la psychologie animale, écrit à propos du chien dans ses *Lettres sur les animaux*: «Cet animal est tellement connu que son exemple seul aurait dû rejeter bien loin toute idée de

l'automatisme des bêtes.» S'ils avaient eu plus de succès que l'œuvre de Descartes, peut-être notre rapport au monde et au vivant en aurait-il été changé. Rappelons qu'au regard de la loi française, les animaux ne sont des «êtres vivants doués de sensibilité» que depuis 2015... ■

« Les animaux du roi », au château de Versailles, jusqu'au 13 février 2022.  
<https://bit.ly/3vyAK8s>



L'auteur a publié:  
**Pollock, Turner, Van Gogh,  
Vermeer et la science...**  
(Belin, 2018)



## LES AUTEURS



**JEAN-MICHEL COURTY  
ET ÉDOUARD KIERLIK**  
professeurs de physique  
à Sorbonne Université, à Paris

# UNE BALANCE QUI NE PERD PAS L'ÉQUILIBRE

Certains dispositifs inventés il y a plusieurs siècles continuent d'intriguer les physiciens. L'astucieuse balance de Roberval en fait partie!

**E**lle a depuis longtemps disparu de nos marchés, mais la balance de Roberval nous est familière: beaucoup d'entre nous l'ont utilisée à l'école pour effectuer des pesées. De la science élémentaire, donc? Pas vraiment. Cette balance a intrigué nombre de physiciens. En particulier, pourquoi les positions des masses sur les plateaux ne jouent-elles pas sur l'équilibre de la balance, alors que l'effet d'une force sur un objet en rotation autour d'un axe varie avec la distance entre cet axe et l'endroit où s'applique la force?

Tout tient à une astuce géniale de Gilles Personne de Roberval (nom du village picard où ce physicien et mathématicien du XVII<sup>e</sup> siècle est né). Dans sa balance, le fléau visible s'accompagne d'un second fléau parallèle dissimulé par le socle, et ces éléments sont articulés avec les tiges verticales qui soutiennent les plateaux de façon à constituer un parallélogramme déformable.

Pour comprendre l'intérêt de ce dispositif, intéressons-nous d'abord à un objet rustique et analogue à une balance: la balançoire tape-cul de notre enfance. Il s'agit d'un tronc d'arbre (plus généralement une barre rigide) qui pivote autour d'un axe horizontal et perpendiculaire au tronc, passant par le centre de masse de ce dernier. Lorsque personne n'est assis sur le tronc, il y a équilibre quel que soit l'angle que fait le tronc avec l'horizontale, puisque l'axe passe par son centre de masse.

Lorsque deux enfants de même masse s'assoient sur le tronc à égale distance de l'axe, l'équilibre est conservé. Si leurs masses diffèrent, l'équilibre peut être maintenu à condition que le plus léger des enfants s'éloigne du centre, afin que le produit de son poids par la distance à l'axe de rotation soit le même que celui de son compagnon. Ce «moment», produit de la force par le bras de levier

(distance entre la ligne d'action de la force et l'axe de rotation), est la grandeur qui compte pour les mouvements de rotation. Il y a équilibre pour la rotation lorsque la somme (vectorielle) des moments est nulle.

## DE LA BALANÇOIRE À LA BALANCE

Pour réaliser une balance rudimentaire, fixons sur ce tronc deux plateaux à égale distance de l'axe central. On constate d'abord que ces plateaux s'inclinent avec le tronc; des masses posées dessus peuvent donc glisser. Ensuite, pour obtenir un équilibre avec deux masses identiques, la position de celles-ci sur les plateaux n'est pas indifférente: il faut les placer elles aussi à égale distance de l'axe central. Enfin, même dans ces conditions, l'équilibre obtenu se révèle instable! Ce n'est pas étonnant. Avec des plateaux situés au-dessus de l'axe, le centre de

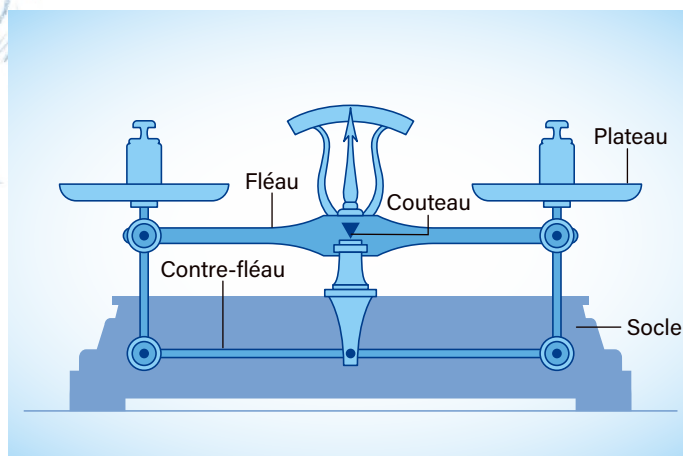






## UNE BALANCE À DOUBLE FLÉAU

La balance de Roberval comporte deux fléaux de même longueur articulés avec deux tiges, de même longueur également, qui soutiennent les plateaux. Les deux fléaux sont fixés en leurs centres à une potence verticale, mais sont libres de pivoter autour de ces centres. Les fléaux et les tiges forment ainsi un parallélogramme déformable ; les tiges restent verticales, de sorte que les plateaux restent horizontaux.



La balançoire tape-cul, au deuxième plan, est analogue à une balance simple dont les plateaux sont fixés sur le fléau et qui s'inclinent donc avec lui. La balançoire du premier plan, qui rappelle le principe de la balance de Roberval, ne présente pas ce type d'inconvénient.

masse de l'ensemble tronc-plateaux-masses est aussi au-dessus de l'axe; il tend donc à passer au-dessous, comme dans un pendule pesant, d'où l'instabilité.

Comment corriger ces trois défauts? Commençons par régler la question de l'indifférence de l'équilibre à la position des masses. Considérons la balance ordinaire à plateaux (*en arrière-plan dans l'illustration ci-dessus*) et sa variante de précision, le trébuchet du joaillier ou la balance d'apothicaire. Dans ces appareils, le fléau, une barre métallique rigide, repose en son centre sur l'arête d'un prisme, le «couteau». Et à chaque extrémité du fléau, on suspend, à égale distance de l'axe, deux plateaux à l'aide de tiges ou de fils.

Lorsqu'on place une masse sur le plateau, le centre de gravité du système masse-plateau-fils n'est pas nécessairement situé toujours au même endroit. Cependant, comme le plateau est suspendu, il se

comporte mécaniquement comme un pendule pesant: le système pivote autour du point de suspension de façon qu'à l'équilibre, le centre de masse du plateau chargé se place parfaitement à la verticale du point de suspension. Autrement dit, où que l'on place la masse sur le plateau, le poids correspondant s'applique toujours au point de suspension sur le fléau.

C'est donc en ajoutant des pivots à notre dispositif que l'on a réglé la question du positionnement des masses. Par ailleurs, si le segment qui relie ces pivots passe aussi par l'axe de rotation du fléau, l'équilibre est indifférent à l'inclinaison du fléau et est donc stable. Pour que le fléau revienne spontanément à l'horizontale, il suffit de décaler légèrement son centre de gravité sous l'axe de rotation, par exemple en ajoutant une simple aiguille dirigée vers le bas.

Ce dispositif a toutefois un inconvénient: pour que les plateaux ne s'inclinent

### À VISITER

En 2005, la municipalité et une association locale de Roberval, dans l'Oise, ont fait construire la plus grande balance de Roberval du monde. Longue de 5,6 mètres et haute de 2,20 mètres, cette balance est pleinement fonctionnelle. Son mécanisme a toutefois été bloqué pour des raisons de sécurité et afin que ce monument ne devienne pas un jeu.

Les auteurs ont notamment publié: **En avant la physique!**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).



pas trop lors des pesées, ils doivent être placés le plus bas possible par rapport aux pivots – en pratique, à une distance au moins égale à deux ou trois fois leur taille. On obtient ainsi les balances d'apothicaire dont la sensibilité atteint le dixième de gramme. Le prix à payer est une taille imposante et un dispositif fort fragile, ce qui en fait d'ailleurs la beauté.

## DU FLÉAU SIMPLE AU DOUBLE FLÉAU

Pour obtenir un appareil plus robuste, Gilles Personne de Roberval a conçu une balance dont les plateaux ne sont pas suspendus, mais placés au-dessus du fléau, comme dans notre balance rudimentaire. Cependant, ce fléau visible n'est que le bras supérieur d'un parallélogramme articulé, fixé sur la potence centrale (voir l'encadré page 89). Un second fléau parallèle, le « contre-fléau », est dissimulé dans le socle. Par construction, les tiges latérales restent verticales quand le parallélogramme se déforme, et les plateaux demeurent ainsi horizontaux quelle que soit l'inclinaison des fléaux.

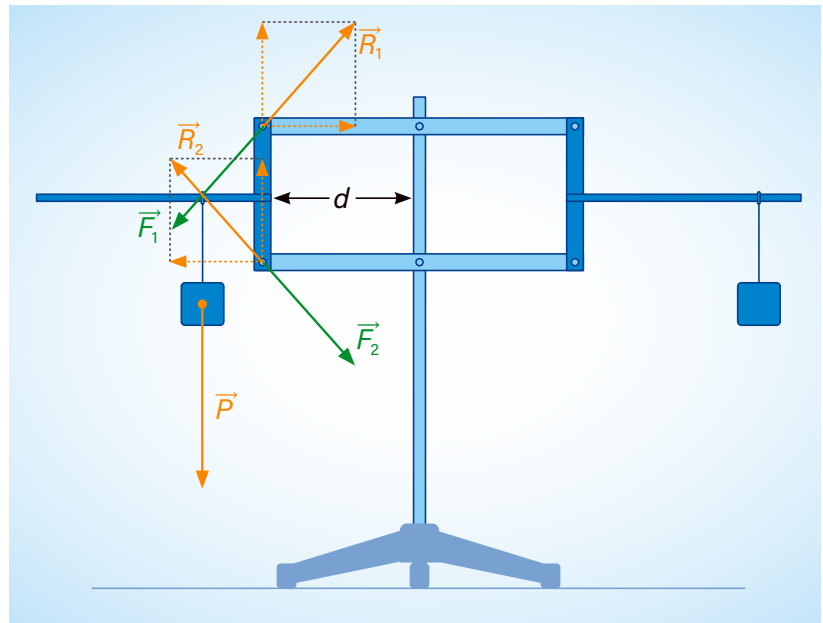
Comment la balance de Roberval s'équilibre-t-elle? Analysons le modèle de démonstration où les plateaux sont remplacés par deux bras horizontaux fixés rigidement au centre des tiges verticales du parallélogramme (voir l'encadré ci-contre). En l'absence de masses ajoutées, cette balance est parfaitement équilibrée.

Maintenons ce modèle dans une position quelconque tout en suspendant une masse sur le bras latéral gauche (par exemple). Trois forces s'exercent sur ce bras et la tige dont il est solidaire: le poids, la réaction du fléau supérieur sur le haut de la tige et la réaction analogue du fléau inférieur sur le bas de la tige. Comme le système est immobile, la somme de ces trois forces est nulle: les composantes verticales des réactions compensent le poids, et leurs composantes horizontales sont de même module, mais de sens opposés.

En vertu de la loi de l'action et de la réaction, la tige exerce, sur chacun des fléaux, des forces opposées aux deux réactions. Quels sont leurs effets sur la rotation des fléaux, solidaires par construction? Les composantes verticales de ces forces créent un moment égal à celui du poids ajouté et s'exerçant à l'extrémité gauche des fléaux. Pour les composantes horizontales, les moments exercés par la tige sur les deux fléaux se compensent, car ces forces horizontales sont opposées tandis qu'elles ont le

## INDÉPENDANCE VIS-À-VIS DE LA POSITION

Ce modèle de démonstration du principe de la balance de Roberval reste à l'équilibre même si les deux masses égales sont suspendues à des distances différentes de l'axe vertical central. La position d'équilibre des « fléaux » représentée ici est horizontale pour simplifier. On considère le système masse-barre-tige de gauche. Il est soumis à trois forces : le poids  $\vec{P}$ , la réaction  $\vec{R}_1$  du fléau supérieur et la réaction  $\vec{R}_2$  du fléau inférieur. La somme des composantes verticales de  $\vec{R}_1$  et  $\vec{R}_2$  est égale au poids  $\vec{P}$ . Par la loi de l'action et de la réaction, les fléaux subissent, à gauche, les forces  $\vec{F}_1 = -\vec{R}_1$  et  $\vec{F}_2 = -\vec{R}_2$ . Le moment total exercé sur eux par  $\vec{F}_1$  et  $\vec{F}_2$  est égal, en module, au produit du poids  $P$  par la distance  $d$ . Il est donc indépendant de la position du point de suspension.



même bras de levier par rapport aux pivots de la potence centrale.

Le point remarquable est que le moment total ne dépend pas de la position de la masse ajoutée sur le bras latéral. Lorsqu'on la déplace, on ne change que le module des composantes horizontales des forces agissant sur les fléaux; or le moment dû à ces composantes est toujours nul!

Ce résultat surprend les physiciens qui font remarquer que les moments des poids posés sur la balance de Roberval, prise dans sa totalité, ne sont pas identiques si les masses ne sont pas à égale distance de la potence centrale. Comment l'équilibre serait-il alors possible? En fait, il faut tenir compte des forces de réaction du support sur lequel est posée la balance. En 2019, Jaeseong Park et deux collègues, en Corée du Sud, ont ainsi montré que ces réactions, verticales et à égale distance de la potence centrale, ne sont pas égales en module. La différence de leurs moments compense justement la différence des moments des poids. La balance est bien à l'équilibre! ■

### BIBLIOGRAPHIE

J. Park et al., **What force and torque are working with the Roberval balance?**, *The Physics Teacher*, vol. 57(3), pp. 166-168, 2019.

P. Chagnon, **The Roberval balance**, *The Physics Teacher*, vol. 30(4), p. 238, 1992.

E. S. Barr, **The Roberval balance**, *The Physics Teacher*, vol. 22(2), p. 121, 1984.



AVEZ-VOUS  IDÉE  
DES RESSOURCES  
QUE L'ON ÉCONOMISE  
QUAND ON RECYCLE ?

---

EN 2018, 1,3 MILLION DE TONNES  
DE PAPIERS ONT ÉTÉ RECYCLÉES.  
CE SONT 25 MILLIARDS DE LITRES D'EAU  
ÉCONOMISÉS, L'ÉQUIVALENT  
DE 8000 PISCINES OLYMPIQUES. ET ÇA,  
C'EST GRÂCE À VOTRE GESTE DE TRI.

PLUS D'INFORMATIONS SUR LE RECYCLAGE  
SUR [TRIERCESTDONNER.FR](http://TRIERCESTDONNER.FR)

---

**CITEO**

Donnons ensemble une nouvelle vie à nos produits

## L'AUTEUR



**HERVÉ LE GUYADER**  
professeur émérite  
de biologie évolutive  
à Sorbonne Université,  
à Paris

# QUAND LES CRAPAUDS DEVIENNENT CANNIBALES

**Lorsqu'une espèce invasive, comme le crapaud-buffle en Australie, réussit à s'implanter, il lui arrive de pulluler à tel point que s'établit une compétition au sein de l'espèce. Dans ce cas, les jeunes doivent faire attention à eux...**

**T**

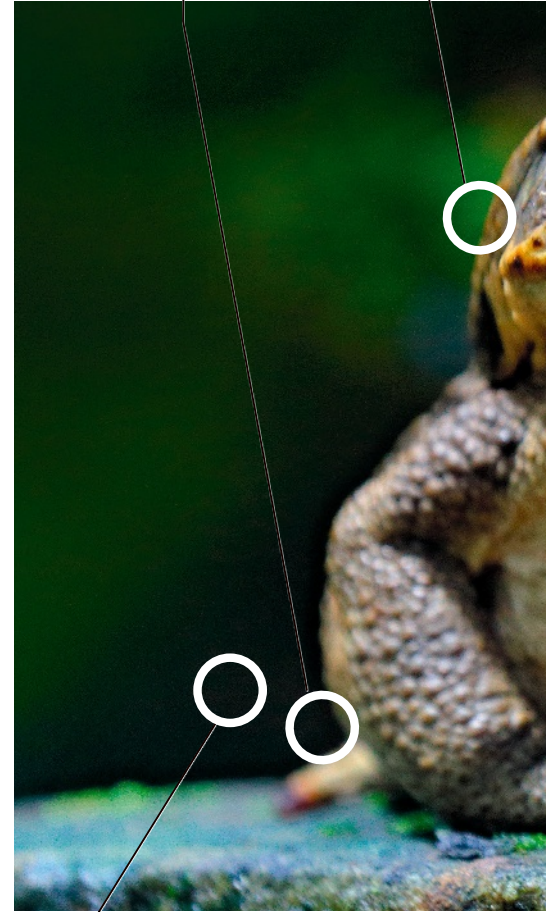
out le monde connaît *Il était un petit navire*, ce chant de marins devenu chanson enfantine. Au troisième couplet, «les vivres vinrent à manquer» et «on tira à la courte paille pour savoir qui serait mangé». Alors, «le sort tomba sur le plus jeune»... Tout enfant comprend immédiatement que le tirage a été truqué, et que le plus jeune – ou le plus faible – est devenu la proie des forts. Comment sauver le mousse? À la réflexion, deux solutions non contradictoires sont possibles: soit des vivres deviennent très vite disponibles, soit le mousse grandit très vite. Dans la chanson, on assiste à la première solution: «Des p'tits poissons dans le navire sautèrent par milliers.» Dans la

vraie vie – celle des crapauds-buffles d'Australie – c'est la deuxième que l'on observe, comme vient de le montrer l'équipe de Richard Shine, à l'université de Sydney.

Originnaire d'Amérique centrale et du Sud, le crapaud-buffle (*Rhinella marina*) est un batracien de belle taille qui se nourrit de petits animaux vivants ou morts (rongeurs, lézards, oiseaux...), mais aussi d'insectes ou de gastéropodes. Malgré son nom scientifique, il vit dans les milieux humides terrestres, ne rejoignant l'eau douce que pour la reproduction. Il porte des glandes cutanées à sécrétions vénéneuses très actives contenant des bufotoxines. Les têtards

Il peut projeter sa sécrétion toxique à plus de 1 mètre quand il se sent menacé.

Les crapauds-buffles femelles produisent chaque année deux rubans de 8 000 à 35 000 œufs, pouvant mesurer jusqu'à 20 mètres de long. Leur fécondation par le sperme des mâles est externe.



Il vit principalement dans les forêts tropicales, mais on le rencontre maintenant aussi dans les jardins, les tuyaux de drainage, les débris ou sous les maisons. Il vit surtout sur la terre ferme et se reproduit dans les eaux peu profondes.



**Crapaud-buffle**  
(*Rhinella marina*)  
Taille: entre  
10 et 15 cm  
en moyenne



## EN CHIFFRES

# 2,65

Le plus gros spécimen de crapaud-buffle jamais observé pesait 2,65 kg pour une longueur de 38 cm, alors qu'en moyenne ces batraciens mesurent entre 10 et 15 cm. Les femelles sont plus grandes que les mâles et atteignent souvent 20 cm.

# 35

L'espérance de vie d'un crapaud-buffle est de 35 ans en captivité, 15 ans dans la nature.

# 200 MILLIONS

En août 1935, 102 crapauds-buffles ont été lâchés dans le Queensland, en Australie, puis en mars 1937, 62 000 jeunes. Depuis, les crapauds-buffles prospèrent. Après moins d'un siècle, leur population est estimée à 200 millions d'individus. L'invasion dans le Queensland progresse à une vitesse de 60 km par an.

Ce batracien se nourrit de nombreux animaux terrestres, avec une préférence pour les petits animaux nocturnes. Les insectes, les mille-pattes et les escargots constituent sa principale nourriture.



fonctionné! On comprend pourquoi les fermiers du Queensland, dans le nord-est de l'Australie, ont voulu l'imiter. Les crapauds ont été implantés en deux vagues: une centaine en 1935, puis plusieurs dizaines de milliers en 1937. Mais en Australie, la canne à sucre était parasitée par d'autres coléoptères – *Lepidiota frenchi* et *Dermolepida albobirtum* –, dont les cycles de vie sont tels qu'ils échappent aux crapauds. Les ravageurs n'ont donc pas été éradiqués, et le crapaud-buffle est devenu invasif. De plus, les prédateurs natifs meurent empoisonnés par ces nouvelles proies et leurs populations s'effondrent. Depuis plus d'une quinzaine d'années, l'équipe de Richard Shine se penche donc sur cette nuisance écologique.

Quand un animal surgit dans un nouvel écosystème, il entre en compétition avec d'autres espèces et subit la pression de son nouvel environnement. C'est, bien sûr, ce qui est arrivé au crapaud-buffle dans les années 1930. Mais il a tant pullulé que le compétiteur de chaque individu appartient maintenant à sa propre espèce! D'interspécifique, la compétition est devenue intraspécifique. Alors, comment gagner? En pratiquant du cannibalisme, comme dans la chanson: on se nourrit et on se débarrasse

sont également toxiques, mais perdent leur toxicité à la métamorphose pour la retrouver à la maturité sexuelle. Ses prédateurs sont variés: caïmans, serpents, poissons-chats, ibis...

## ERREUR DE CASTING

Au XIX<sup>e</sup> siècle, sa voracité et son éclectisme l'ont désigné comme prédateur « idéal » de ravageurs. Ainsi, en 1844, on l'a introduit en Jamaïque pour lutter contre les rats. Mais c'est son utilisation à Porto Rico, au début du XX<sup>e</sup> siècle, qui, paradoxalement, a été catastrophique pour la suite. On l'y a introduit pour réduire la population de coléoptères parasites de la canne à sucre (genre *Phyllophaga*)... et cela a



Hervé Le Guyader a récemment publié: **Ma galerie de l'évolution** (Le Pommier, 2021).

d'ennemis potentiels. Chez le crapaud, c'est le têtard qui est cannibale.

En fait, dépourvus des armes d'un carnivore, les têtards ne peuvent s'attaquer qu'aux œufs ou aux très jeunes nouvellement éclos qui, normalement, sont protégés des prédateurs par un taux élevé de bufotoxines. Richard Shine et ses collègues l'ont d'abord constaté sur le terrain, puis ils ont réalisé des expériences en laboratoire pour comparer les comportements de têtards d'Australie (invasifs) et de Guyane française (natifs, voir l'encadré ci-contre). Tous présentent un comportement cannibale opportuniste, mais le têtard australien a aussi acquis un comportement actif de recherche de ses jeunes congénères, qu'il repère par la bufotoxine. Le résultat ? Ce cannibalisme est la principale source de mortalité des jeunes, dont la survie est réduite de 99%.

En biologie évolutive, une telle réduction indique une pression de sélection considérable. En fait, le stade vulnérable est fugitif – entre la sortie de la gangue de l'œuf et le moment où la nage pour se nourrir d'algues devient possible. Plus ce stade raccourcit, plus la probabilité d'être dévoré diminue. Et c'est ce que l'équipe observe. Le stade vulnérable dure en moyenne cinq jours pour les têtards natifs de Guyane française, contre trois pour ceux d'Australie. Mais tout a un prix ! Les têtards qui grandissent vite au départ ralentissent ensuite leur croissance et sont plus fragiles.

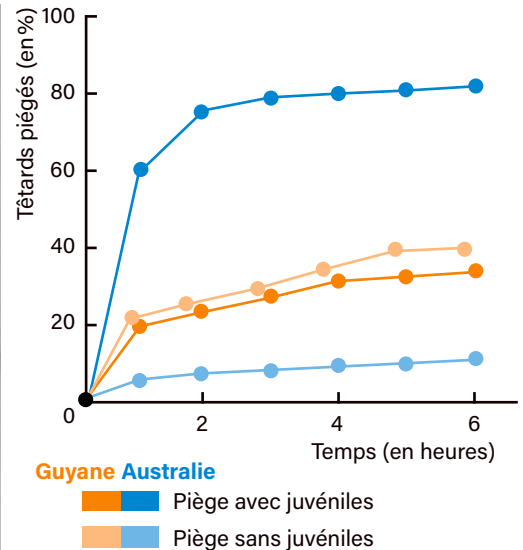
## LE CRAPAUD, LA FOURMI ET LE VIRUS

Comment stabiliser ou réduire une telle population invasive ? Pour le moment, aucun remède miracle n'a été trouvé, étant donné que le crapaud-buffle empoisonne les prédateurs potentiels. Dans les années 2010, Richard Shine a proposé de conditionner ces derniers à une aversion au goût en leur offrant des têtards avant l'arrivée massive des crapauds-buffles : plus petits, les têtards présentent suffisamment de toxines pour les indisposer, mais pas assez pour les tuer. Une première expérience a été réalisée avec succès sur le varan des sables (*Varanus panoptes*) et est en voie de généralisation. Mais ce n'est qu'un pis-aller. Cependant, quelques autres pistes se dessinent.

En 2010, Richard Shine et ses collègues ont remarqué que le crapaud-buffle, à la différence des batraciens natifs, n'a pas l'agilité nécessaire pour échapper à

## TÊTARDS CANNIBALES

Pour comparer les comportements des têtards guyanais et australiens, l'équipe de Richard Shine a mis dans un aquarium des têtards en présence de deux pièges, l'un contenant de jeunes têtards tout juste éclos, l'autre seulement de l'eau, et ce pour chaque sorte de têtards. Les têtards guyanais (en orange) sont allés indifféremment dans l'un ou l'autre des pièges, 46 % d'entre eux choisissant le piège avec des proies (en orange soutenu). En revanche, 88 % des têtards australiens se sont dirigés vers le piège avec des proies (en bleu soutenu et en photo), ce qui prouve l'existence d'un comportement cannibale, alors qu'auparavant les têtards ne mangeaient que des juvéniles que lorsqu'ils en rencontraient.



la fourmi carnivore *Iridomyrmex reburus*, répandue en Australie tropicale (dont une grande portion dans le nord du Queensland). Attirer cet insecte au bord des mares où les têtards se métamorphosent en crapauds pourrait favoriser leur prédation, d'autant que la fourmi résiste mieux à la bufotoxine que les prédateurs vertébrés.

Enfin, en 2018, le séquençage du génome du crapaud-buffle a permis de déceler des différences entre les animaux de Guyane française et ceux d'Australie. C'est ainsi que l'équipe de Peter White, à l'université de Nouvelle-Galles du Sud, à Sydney, a constaté que les génomes des deux populations ne contiennent pas les mêmes virus, et que les crapauds invasifs ont côtoyé beaucoup moins de virus que les autres. L'idée est donc d'utiliser les virus de Guyane française pour une lutte biologique en Australie. Cela revient à calquer ce que le gouvernement australien a réalisé en 1996 puis 2017 avec succès contre le lapin en dispersant un virus hémorragique adapté. Mais il est indispensable de vérifier que de tels virus ne sont pas mortels pour les autres batraciens autochtones... et d'autres organismes. ■

## BIBLIOGRAPHIE

J. L. DeVore et al., **The evolution of targeted cannibalism and cannibal-induced defenses in invasive populations of cane toads**, *PNAS*, vol. 118(35), article e210 076 5118, 2021.

A. G. Russo et al., **Discovery of novel viruses associated with the invasive cane toad (*Rhinella marina*) in its native and introduced ranges**, *Front. Microbiol.*, vol. 12, article 733 631, 2021.

G. Ward-Fear et al., **Ecological immunization : In situ training of free-ranging predatory lizards reduces their vulnerability to invasive toxic prey**, *Biol. Lett.*, vol. 12, article 201 50 863, 2016.





## L'AUTEUR



**HERVÉ THIS**  
physicochimiste, directeur  
du Centre international  
de gastronomie moléculaire  
AgroParisTech-Inra, à Paris

# DES SUSPENSIONS DANS LES SAUCISSES

La saucisse n'est pas une émulsion, mais une suspension de particules solides dans un liquide. Un système qui laisse bien de la place à la créativité.



Les délicieuses knacks, ou saucisses de Strasbourg, sont une spécialité d'Alsace qui remonte au XVI<sup>e</sup> siècle.

**U**ne émulsion, par exemple la sauce mayonnaise, est la dispersion d'une phase liquide dans une autre phase liquide. Les knacks (des saucisses alsaciennes) n'en sont pas du tout. Leur préparation nécessite de mixer finement du bœuf et du porc avec échalotes et ail; on ajoute du gras de porc en mixant, mais, pour éviter l'échauffement, on ajoute régulièrement de la glace pilée (15 à 20%) et l'on cesse de broyer quand la pâte a du corps, après 10 à 15 minutes; on ajoute alors du sel, des épices, puis on embosse, on fume éventuellement, et l'on cuit dans de l'eau portée à 72 °C pendant 12 minutes. Pas d'émulsion là-dedans!

Interprétons ce qui se passe. On part de viande, qui est faite essentiellement de fibres musculaires (des tubes), qui sont limitées par du tissu collagénique (une protéine insoluble à froid) et qui contiennent de l'eau (environ 80%) et des protéines solubles. Quand on se contente de découper, sans insister beaucoup, les fibres musculaires (les tubes) sont divisées, sans plus. Mais si l'on insiste, alors les protéines de l'intérieur des tubes sont libérées. À ce stade, on a donc une suspension: des particules solides dispersées dans de l'eau où sont dissoutes les protéines libérées.

Quand on ajoute de la matière grasse, les lames du mixeur divisent cette dernière en morceaux microscopiques. Grâce à l'ajout de glace, cette graisse reste à l'état solide: il n'y a pas d'émulsion, puisque le gras n'est pas liquide.

Reste qu'un système dispersé tel qu'une suspension doit comporter une quantité d'eau suffisante, ce qu'apporte la glace quand elle fond. Plus on mixe

énergiquement, plus les particules sont petites, et plus la préparation est ferme, tout comme une mayonnaise devient ferme quand on la fouette énergiquement. Certes, une partie de la matière grasse est à l'état liquide, mais comme la préparation est maintenue à la température de 2-3 °C, elle reste globalement à l'état solide.

Les préparations pour knacks sont ainsi des suspensions, et non des émulsions. À quoi bon insister sur la bonne terminologie? Parce que l'analyse de la composition d'un mets peut amener des diversifications et des améliorations.

## EAU, PROTÉINES, GRAS ET SOLIDES DISPERSÉS

Les suspensions ont quatre composantes essentielles: l'eau, les solides dispersés, le gras dispersé et les protéines qui assurent la dispersion, tout comme les lécithines assurent la dispersion des cristaux de sucre dans le beurre de cacao, quand on procède au conchage du chocolat, tout comme les protéines du jaune d'œuf assurent la dispersion des gouttes d'huile dans la confection des mayonnaises, tout comme les protéines et les phospholipides du jaune d'œuf permettent la dispersion des gouttes de beurre fondu lors de la confection des sauces béarnaise ou hollandaise...

L'eau doit être en quantité suffisante, mais elle n'a pas d'intérêt gustatif. Pourquoi ne pas la remplacer par une

solution aqueuse plus intéressante: vin, vin réduit, bouillon, fond de champignons, jus de légumes, etc.? On pourrait nommer «suspensions charcutières» ces nouvelles préparations. On pourrait aussi remplacer la graisse de porc par de l'huile d'olive, du foie gras, du fromage, du beurre, etc. De quoi exalter votre créativité! ■



## LA RECETTE

- 1 Cuire à couvert deux pieds de porc pendant 4 heures, dans de l'eau, avec deux carottes, un oignon, deux feuilles de laurier et une gousse d'ail.
- 2 Désosser les pieds. Réserver au frais la chair, les cartilages, les carottes, l'oignon et l'ail.
- 3 Continuer la cuisson des os, toujours à couvert, pendant une nuit à tout petit frémissement.
- 4 Jeter les os. Réduire le bouillon jusqu'à ce qu'il devienne sirupeux, puis le congeler.
- 5 Mixer finement 500 g de viande maigre de porc avec les chairs et cartilages des pieds, les carottes, l'oignon et l'ail.
- 6 Quand la mée est fine, ajouter le fond congelé. Mixer à nouveau.
- 7 Ajouter 400 g de gras de porc divisé en petits cubes et mixer.
- 8 Embosser dans des boyaux lavés, ou bien former en boudins dans du film alimentaire.
- 9 Cuire à 70 °C durant 15 minutes. Avant de servir, réchauffer ces suspensions charcutières dans de l'eau frémissante.







Retrouvez tous  
nos articles sur  
[www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)

## p.50 **220 KM<sup>2</sup>**

Le territoire de la panthère des neiges, dans les montagnes d'Asie centrale, avoisine 220 km<sup>2</sup> pour un mâle et 130 km<sup>2</sup> pour une femelle. On estime qu'il reste entre 4 000 et 7 000 individus sur une zone vaste comme le Mexique.

## p.70 **GUERRE**

La guerre semble exister chez d'autres espèces qu'*Homo sapiens*, même si elle est rare dans le règne animal. Les primatologues définissent la guerre comme une violence de « coalition », impliquant des groupes d'animaux. En 2014, des chercheurs ont montré que chez les chimpanzés, 66 % des meurtres étaient dus à des membres d'une autre communauté.

p.22 **Le zéro net apparaît comme une astuce comptable et dépolitisée, qui retarde la prise de conscience de l'urgence à modifier nos modes de vie**

CATHERINE AUBERTIN économiste de l'environnement à l'IRD

## p.58 **99%**

Plus de 99 % des décès liés à un cancer ne sont pas dus à la tumeur primaire, mais aux métastases, des tumeurs secondaires formées à partir de cellules cancéreuses qui se sont détachées de la tumeur primaire et qui ont essaimé.

## p.80 **ESPÉRANCE MATHÉMATIQUE**

**Pour une variable aléatoire, cette moyenne est la somme de toutes les valeurs possibles, chacune étant multipliée par la probabilité d'avoir cette valeur. Pour calculer l'espérance de vie à la naissance suivant cette formule, il faudrait avoir les dates de décès de toutes les personnes nées l'année en question. C'est clairement impossible pour les périodes récentes, et les statisticiens doivent procéder autrement.**

## p.7 **CHATBOTS**

Ces programmes reposant sur des algorithmes d'intelligence artificielle sont capables de mener une conversation avec un interlocuteur humain. L'un de ces « agents conversationnels » a été conçu récemment pour répondre de façon individualisée aux questions de personnes réticentes à se faire vacciner contre le Covid-19.

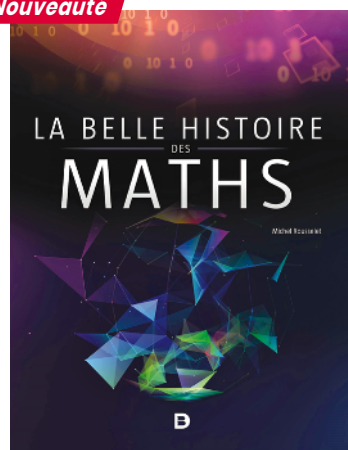
## p.92 **BUFOTOXINE**

Le crapaud-buffle porte des glandes cutanées à sécrétions vénéreuses très actives contenant des bufotoxines. Elles le protègent de certains prédateurs. Le têtard présente aussi cette toxine, mais la perd pendant la métamorphose avant de la retrouver à la maturité sexuelle.



# Offrez des beaux livres !

Nouveauté



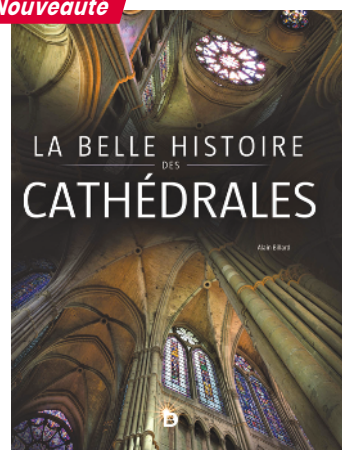
## La belle histoire des maths

Michel Rousselet

2021 | 368 pages, relié, illustré | 9782807331402 | 31,90 €

L'incroyable richesse des mathématiques et de ses applications à travers un tour d'horizon chronologique et largement illustré des grandes étapes qui ont marqué son évolution.

Nouveauté



## La belle histoire des cathédrales

Alain Billard

2021 | 320 pages, relié, illustré | 9782807331396 | 29,90 €

Prouesses architecturales de la démesure, chargées d'histoire, les cathédrales sont des symboles de la vie spirituelle, le témoignage du savoir-faire des hommes et de la détermination de leurs commanditaires. Ce panorama chronologique retrace l'évolution architecturale des cathédrales jusqu'aux projets contemporains les plus fous.

Nouveauté



## Petit manuel de potions pour sorciers débutants

Jean Espérance

2021 | 112 pages, relié, illustré | 9782807338937 | 16,90 €

Si vous avez toujours rêvé d'intégrer une école de sorcellerie sans jamais avoir pu en franchir les portes, ce livre est pour vous. Plongez au cœur du monde magique des potions. Car ne vous y trompez pas, la magie existe bel et bien dans notre monde. Nous lui avons simplement donné un autre nom : la chimie.

Nouveauté



## Super-héros, Science ou fiction ?

Mark Brak

Octobre 2021 | 288 pages | 9782807331457 | 18,90 €

Superman, Iron Man, Captain America, Aquaman, Spiderman ... Découvrez ce qui se cache derrière les pouvoirs des super héros. Pourrait-on fabriquer l'armure d'Iron Man? Comment fonctionne le marteau de Thor ? Plus de cinquante questions de sciences ludiques et instructives sur le monde de vos super-héros préférés.

## ÉTUDE DE CAS

# Accélérez et améliorez le développement de vos produits.

Les ingénieurs et les chercheurs de l'industrie accélèrent le développement de produits en créant des applications de simulation numérique et en les déployant au sein de leurs organisations. COMSOL Multiphysics® vous permet de créer des applications spécialisées et COMSOL Server™ et COMSOL Compiler™ vous aident à les distribuer aux bons collaborateurs et au bon moment dans votre cycle de développement de produits.

EN SAVOIR PLUS [comsol.blog/product-development](https://comsol.blog/product-development)

The screenshot displays the COMSOL Server Application Library interface. The top navigation bar includes the COMSOL logo, user information (comsol175599, power user), and a 'Log Out' button. The main area is titled 'Running Applications' and lists four active applications: 0001 Absorptive Muffler Designer, 0002, 0003, and 0004. The 'Absorptive Muffler Designer' application is selected, showing its session details (3min 16s) and a 'Reconnect in Browser' button. Below this is a 'Library' section with a search bar and the application name. A secondary window titled 'Forced Air Cooling with Heat Sink' is open, showing a 3D simulation of a heat sink with air flow streamlines. The 'Input and Results' panel on the left lists parameters for the heat sink geometry and operating conditions. The 'Graphics' panel on the right shows a temperature field and velocity streamlines, with a color scale for temperature ranging from 20 to 70 °C and a velocity scale from 0.7 to 1.6 m/s.

Parameter	Value
Depth	2.5 cm
Length	2.5 cm
Thickness	2.5 mm
Corner fillet radius	2.0 mm
Chamfer length, angle 45°	1.25 mm
Inlet distance	2.0 cm
Outlet distance	6.0 cm
Lateral distance	0.5 cm
Top distance	0.5 cm
Inlet velocity	1.0 m/s
Inlet temperature	22 °C
Heat source temperature	100 °C
Dissipated power	4.074 W
Pressure loss	0.9036 Pa



Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour la conception et la simulation des dispositifs et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche.